



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN**

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

Estudio de la eficiencia de encaminamiento del
protocolo AODV en redes *ad hoc* inalámbricas de
gran escala

Autora: María Elena Gil Jiménez

Tutora: Lorena Fernández Martínez

Co-tutora: Inmaculada Mora Jiménez

Curso académico: 2008/2009

TÍTULO: *Estudio de la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV en redes ad hoc inalámbricas de gran escala*

AUTOR: *María Elena Gil Jiménez*

TUTORA: *Lorena Fernández Martínez*

CO-TUTORA: *Inmaculada Mora Jiménez*

La defensa del presente Proyecto Fin de Carrera se realizó el día
siendo calificada por el siguiente tribunal:

PRESIDENTE:

SECRETARIO:

VOCAL:

Habiendo obtenido la siguiente calificación:

CALIFICACIÓN:

Presidente

Secretario

Vocal

Resumen

Las últimas décadas han sido testigo de un crecimiento vertiginoso del interés por las redes *ad hoc* inalámbricas. La naturaleza dinámica y carente de infraestructura de estas redes exige un nuevo conjunto de estrategias para proporcionar un servicio de comunicación fiable extremo a extremo. En el contexto de las redes *ad hoc* inalámbricas, el encaminamiento emerge como una de las áreas más atractivas, puesto que el proceso de encaminamiento se define como el acto de transmisión de información desde una fuente hasta un destino, esto es, extremo a extremo. Debido a las restricciones inherentes a las redes inalámbricas, los modelos de encaminamiento tradicionales sobre los que se asientan las redes fijas no son aplicables a las redes *ad hoc*. Como resultado, el encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas ha gozado de una gran atención durante los últimos años. Esto ha llevado a la proliferación de numerosos protocolos de encaminamiento, tratando cada uno de ellos de cubrir las necesidades de los diferentes tipos de escenarios. En consecuencia, se hace imprescindible estudiar el comportamiento de estos protocolos bajo configuraciones de red variadas. Este Proyecto Fin de Carrera presenta una exhaustiva evaluación sobre las prestaciones de uno de los protocolos de encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas más ampliamente extendido, el protocolo AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*). Además de ofrecer un profuso estudio sobre los protocolos de encaminamiento actuales en redes *ad hoc* inalámbricas, el proyecto presenta un procedimiento integral para el análisis de las capacidades de este protocolo sobre redes compuestas por un alto número de nodos. Estas prestaciones se miden en base al concepto de eficiencia de encaminamiento, que se define como la capacidad para establecer el camino más corto posible entre un nodo origen y un nodo destino. Con el fin de comprender aquellos factores relacionados con las prestaciones del protocolo, se estudian diversos escenarios de red. Las conclusiones derivadas del análisis de los resultados permiten evaluar cualitativamente las capacidades del protocolo al tiempo que abren un amplio rango de líneas futuras de investigación en este terreno.

Abstract

The last decades have witnessed a vertiginous growth of interests in the wireless *ad hoc* networking arena. The infrastructureless and the dynamic nature of these networks demands a new set of strategies to be implemented in order to provide efficient end-to-end communication. One of the most appealing areas in wireless *ad hoc* networks is routing, considering that routing is defined as the transmission of information from a source to a destination, that is, end to end. Due to their inherent restrictions, the traditional models based on fixed networks are not suitable for *ad hoc* networks. As a result, the *ad hoc* routing has received a tremendous amount of attention throughout the last years. This has led to the proliferation of a large number of routing protocols, each of them attempting to meet the needs of different scenarios. Hence, it is essential to study the performance of those protocols regarding a variety of network configurations. This Final Degree Project presents a comprehensive evaluation of one of the most widespread *ad hoc* routing protocols, AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*). In this report, in addition to offering a thorough study of the present-day *ad hoc* routing protocols, a whole procedure is shown for the analysis of this protocol capabilities upon networks comprising a large number of nodes. This performance is measured regarding the concept of routing efficiency, which is defined as the capability of establishing the shortest possible path from a source node to a destination one. With the aim of gaining an insight into those factors involving the protocol performance, several networking scenarios are under review. The conclusions drawn from the results analysis let qualitatively evaluate the protocol capacities, as well as they open up a wide range of new research works in this field.

Índice general

Resumen	v
Abstract	vi
Agradecimientos	vii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tablas	xv
Acrónimos	xvii
Símbolos	xix
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodología y Planificación	5
1.4. Organización de la memoria	7
2. Redes <i>ad hoc</i> inalámbricas	9
2.1. Introducción	9
2.1.1. Definición	10
2.1.2. Aplicaciones	11
2.2. Encaminamiento <i>ad hoc</i>	11
2.2.1. Clasificación de los protocolos de encaminamiento para redes <i>ad hoc</i> inalámbricas	12
2.2.1.1. Planificación	14
2.2.1.2. Modelo de información de estado	14
2.2.1.3. Modelo de transmisión	15
2.2.1.4. Direccionamiento	16
2.2.1.5. Estructura	16
2.2.1.6. Modelo de comunicación	17
2.2.1.7. Modos de actualización	17
2.2.1.8. Número de caminos buscados	18
2.2.1.9. Método de cálculo de rutas	18

2.2.2. Estudio comparativo	19
2.2.3. Eficiencia de encaminamiento	21
3. Protocolo de encaminamiento AODV	27
3.1. Introducción	27
3.2. Información de encaminamiento	29
3.3. Descubrimiento de caminos	30
3.3.1. Formación del camino de vuelta	30
3.3.2. Formación del camino de ida	32
3.4. Mantenimiento de caminos	33
3.5. Alcance de los mensajes de control del protocolo AODV	35
3.6. Parámetros	35
3.7. Particularidades	36
4. Entorno de trabajo	39
4.1. Recursos empleados	39
4.1.1. Estación de trabajo	40
4.1.2. Nodo raíz	40
4.1.3. Nodos secundarios	41
4.2. Herramientas de simulación de red	41
4.2.1. Comparativa de herramientas de simulación de red	41
4.2.1.1. Simulador de red ns-2	42
4.2.1.2. Simulador de red ns-3	42
4.2.1.3. Simulador de red OMNet++	42
4.2.1.4. Simulador de red OPNET	43
4.2.2. Justificación de la elección del simulador de red ns-2	43
5. Evaluación de la eficiencia de encaminamiento y descripción de los experimentos	47
5.1. Formalización teórica de la eficiencia de encaminamiento	47
5.2. Caracterización de los escenarios	50
5.2.1. Topología	51
5.2.2. Dimensionamiento	55
5.2.3. Cobertura	56
5.2.4. Desplazamiento	57
5.3. Descripción de las simulaciones	58
5.3.1. Elección de escenarios	58
5.3.2. Generación de escenarios	59
5.3.3. Configuración de la herramienta de simulación de red ns-2	62
5.3.4. Edición del <i>script</i> de usuario	62
5.3.5. Automatización de las simulaciones	64
5.3.6. Filtrado de datos	67
6. Resultados	71
6.1. Método	71
6.1.1. Estructura de los datos obtenidos con el modelo teórico	72
6.1.2. Estructura de los datos obtenidos experimentalmente	73
6.1.3. Tratamiento de los datos obtenidos experimentalmente	76

6.1.4.	Elección del tamaño de los intervalos de integración	80
6.1.5.	Criterio de comparación de las distribuciones teórica y experimental	81
6.1.6.	Limitaciones de los modelos teóricos en espacio continuo	85
6.2.	Análisis de resultados para los distintos escenarios	90
6.2.1.	Análisis de los resultados para el Escenario 1	91
6.2.2.	Análisis de los resultados para el Escenario 2	96
6.2.3.	Análisis de los resultados para el Escenario 3	99
6.2.4.	Análisis de los resultados para el Escenario 4	102
7.	Conclusiones y líneas de trabajo futuras	109
7.1.	Conclusiones	109
7.2.	Líneas de trabajo futuras	111
	Bibliografía	113

Índice de figuras

1.1. Arquitectura de una red celular y de una red <i>ad hoc</i>	3
1.2. Metodología	6
1.3. Planificación	7
2.1. Clasificación de los protocolos de encaminamiento para redes <i>ad hoc</i>	13
3.1. Inundación con mensajes RREQ	31
3.2. Generación de caminos de vuelta	32
3.3. Reenvío de mensajes RREP	33
3.4. Diagrama de flujo para la actualización de rutas	34
3.5. Envío de paquetes sobre el camino de ida	34
3.6. Mensajes de encaminamiento en AODV	35
4.1. Esquema de red de los equipos empleados	40
4.2. Perspectiva de ns-2 por parte de un usuario	44
5.1. Topología no regular	48
5.2. Topología regular	49
5.3. Teselaciones regulares	52
5.4. Teselación $\{3, 6\}$	53
5.5. Teselación $\{4, 4\}$	53
5.6. Teselación $\{6, 3\}$	54
5.7. Distancia a primeros y segundos vecinos	57
5.8. Gráfico interrelación programas Matlab y ficheros de texto para la generación de topologías triangulares	60
5.9. Gráfico interrelación programas Matlab y ficheros de texto para la generación de topologías cuadradas	61
5.10. Diagrama de flujo del <i>script complete_run.sh</i>	65
5.11. Diagrama de flujo del <i>script single_run.sh</i>	66
5.12. Diagrama de flujo del <i>script run.sh</i>	68
6.1. Curvas teóricas	73
6.2. Número de valores de R/L en función del número de saltos H para cada escenario	76
6.3. Distribución de probabilidad del número de saltos H , p_H , para cada escenario	77
6.4. Escenario 1. Histograma normalizado de la v.a. $Z^e (H = 6)$	78
6.5. Escenario 4. Histograma normalizado de la v.a. $Z^e (H = 6)$	78
6.6. $\rho_Z^{t,2D}$ correspondiente a $\xi/L = 0,56$ y p_Z^t equivalente	79

6.7. Escenario 1. $p_{Z (H=6)}^e$	80
6.8. Escenario 4. $p_{Z (H=6)}^e$	80
6.9. Escenario 4. Elección de la longitud del intervalo de integración en escenarios no fijos	81
6.10. Escenario 1. Elección de la longitud del intervalo de integración	82
6.11. Escenario 4. Evolución del valor de $10 \log_{10}(DKL)$ en función del valor de ξ/L	83
6.12. Escenario 3. Evolución de la divergencia en función de ξ/L	85
6.13. Escenario 3. Evolución del cálculo del producto escalar en función de ξ/L	86
6.14. Modelo continuo en el que $P_Z(Z = 1) = 0$	86
6.15. Escenario 4. Evolución del valor de la DKL en función de z para $H = 3$	87
6.16. Escenario 4. Comparación de $p_{Z (H=3)}^e$ frente a p_Z^t en función de z	88
6.17. Escenario 2. Reducción del rango de R/L	89
6.18. Escenario 2. Caminos posibles para $H = 2$	90
6.19. Escenario 1. DKL mínima en función de H	93
6.20. Escenario 1. $p_{Z H}^e$ frente a $p_Z^{t,3D}$ en función de z	94
6.21. Escenario 1. $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z	95
6.22. Escenario 1. $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H	95
6.23. Escenario 1. Representación gráfica para justificar dos valores de eficiencia	96
6.24. Escenario 2. DKL mínima en función de H	97
6.25. Escenario 2. $p_{Z H}^e$ frente a $p_Z^{t,3D}$ en función de z	98
6.26. Escenario 2. $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z	99
6.27. Escenario 2. $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H	100
6.28. Escenario 3. DKL mínima en función de H	101
6.29. Escenario 3. $p_{Z H}^e$ frente a $p_Z^{t,3D}$ en función de z	102
6.30. Escenario 3. $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z	103
6.31. Escenario 3. $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H	103
6.32. Escenario 4. DKL mínima en función de H	104
6.33. Escenario 4. $p_{Z H}^e$ frente a $p_Z^{t,3D}$ en función de z	105
6.34. Escenario 4. $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z	106
6.35. Escenario 4. $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H	107

Índice de tablas

2.1. Aplicaciones de las redes <i>ad hoc</i>	11
2.2. Estudio comparativo de los protocolos de encaminamiento <i>ad hoc</i> proactivos	22
2.3. Estudio comparativo de los protocolos de encaminamiento <i>ad hoc</i> reactivos	23
5.1. Número nodos en función del número de capas	56
5.2. Resumen de los escenarios simulados	59
6.1. Número de valores R/L en función del escenario y H	75

Acrónimos

2D	2 Dimensiones
3D	3 Dimensiones
ABR	A ssociativity- B ased R outing
AODV	A d hoc O n demand D istance V ector
CBR	C onstant B it R ate
CDF	C umulative D istribution F unction
CDMA	C ode D ivision M ultiple A ccess
CGSR	C luster- H ead G ateway S witch R outing
CSMA/CA	C arrier S ense M ultiple A ccess, C ollision A voidance
BASH	B ourne- A gain S Hell
DKL	D ivergencia de K ullback- L eibler
DARPA	D efense A dvanced R esearch P rojects A gency
DSDV	D estination S equenced D istance V ector
DSR	D ynamic S ource R outing
EE	E stado de E nlaces
FSR	F isheye S tate R outing
GNU	G NU is N ot U nix
GSR	G lobal S tate R outing
GUI	G raphical U ser I nterface
HSR	H ierarchical S tate R outing
IE	I nversión de E nlaces
IEEE	I nstitute of E lectrical and E lectronics E ngineers
IETF	I nternet E ngineering T ask F orce
IP	I nternet P rotocol
IPSec AH	I P S ecurity A uthentication H header
LSP	L ink S tate P acket
MAC	M edium A ccess C ontrol
MANET	M obile <i>Ad hoc</i> N ETwork
MIT	M assachusetts I nstitute of T echnology
ns-2	N etwork S imulator-version 2
OLSR	O ptimized L ink S tate R outing
OSI	O pen S ystem I nterconnection
OTcl	O bject T ool C ommand L anguage
PAN	P ersonal A rea N etwork
PE	P roducto E scalar

PDF	P robability D ensity F unction
PMF	P robability M ass F unction
QoS	Q uality of S ervice
RAM	R andom A ccess M emory
RERR	R oute ERR or
RFC	R equest F or C omments
RREP	R oute RE PlY
RREP-ACK	R oute RE PlY ACK nowledgement
RREQ	R oute RE QuesT
SSA	S ignal S tability-based A daptive
SDRAM	S ynchronous D ynamic R AM
TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess
TORA	T emporally- O rded R outing A lgorithm
TTL	T ime- T o- L ive
UDP	U ser D atagram P rotocol
v.a.	variable a leatoria
VD	V ector de D istancias
WLAN	W ireless L ocal A rea N etwork
WRP	W ireless R outing P rotocol
WSN	W ireless S ensor N etwork

Símbolos

$[\alpha]$	Función piso de una variable α
a_x	Coordenada de un vector bidimensional en el eje de abcisas
a_y	Coordenada de un vector bidimensional en el eje de ordenadas
A	Grado de un nodo
\bar{A}	Grado medio de un nodo
A_H	Número de posibles caminos para un número de saltos H
C	Número de capas en una teselación regular
$\Delta \mathbf{x}_h$	Diferencia de posición entre dos nodos de la red
d	Distancia entre dos nodos adyacentes
d_{1v}	Distancia de un nodo a sus primeros vecinos
d_{2v}	Distancia de un nodo a sus segundos vecinos
D	Diámetro de una red expresado en número de nodos
D_d	Número máximo de destinos deseados
H	Número de saltos desde un nodo origen hasta un nodo destino
L	Longitud del camino que se establece desde un nodo origen hasta un nodo destino
M	Número medio de nodos en una agrupación o <i>cluster</i>
N	Número de nodos en una red
$\{p, q\}$	Teselación formada por polígonos regulares de p aristas y q politopos
$P()$	Probabilidad
ρ_U	Función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria continua U
p_V	Función de masa de probabilidad de la variable aleatoria discreta V
\mathbf{R}	Distancia euclídea desde un nodo origen hacia un nodo destino
R	Módulo de \mathbf{R}
σ	Factor de desplazamiento
$\hat{\mathbf{u}}_x$	Vector unitario en el eje de abcisas
$\hat{\mathbf{u}}_y$	Vector unitario en el eje de ordenadas
\mathbf{x}_h	Vector de posición del nodo h sobre un espacio bidimensional
\mathbf{x}_0	Vector de posición del nodo origen sobre un espacio bidimensional
\mathbf{x}_H	Vector de posición del nodo destino sobre un espacio bidimensional
ξ	Radio de persistencia
ξ/L	Radio de persistencia normalizado
Y	Número de nodos que forman el camino por donde se transmite un paquete de respuesta

W	Diámetro del camino por el que se transmite un paquete de respuesta expresado en número de nodos
Z	Variable aleatoria del cociente R/L

*A mi madre, por forjar mi núcleo.
A Marina, por ser la mitad de mi equipo.*

Capítulo 1

Introducción y objetivos

En este capítulo introductorio se describe el contexto en el que se circunscribe el presente proyecto y sus aspectos organizativos. En primer lugar, en la Sección 1.1, se exhibe el marco en el que cobra sentido este trabajo. En la Sección 1.2, se enumeran los objetivos a cumplir para su correcta consecución. La Sección 1.3 muestra la secuencia de fases en las que se descompone el trabajo realizado y la planificación programada para cada una de ellas. Por último, en la Sección 1.4, se exponen los contenidos de los capítulos de esta memoria.

1.1. Motivación

Es un hecho bien sabido que una de las revoluciones tecnológicas más significativas en los últimos tiempos ha sido la aparición de las redes inalámbricas. Desde su invención en los años 70, la historia de la industria de las telecomunicaciones ha sido testigo de su vertiginoso crecimiento durante la última década.

Existen dos vertientes en cuanto a redes inalámbricas se refiere [1, 2] atendiendo a la arquitectura de red subyacente. En primer lugar se tienen las redes inalámbricas con infraestructura. Dentro de este tipo de redes, uno de los ejemplos más significativos son las redes celulares. Un sistema de telefonía celular proporciona conexión inalámbrica a la red telefónica básica desde cualquier localización de usuario dentro del radio de cobertura de la red. Los sistemas celulares acomodan un gran número de usuarios dentro de un área geográfica extensa, empleando un espectro de frecuencia limitado. Los sistemas radio celulares proporcionan un servicio de alta calidad que en ocasiones es comparable con el de los sistemas telefónicos cableados [3]. En este tipo de redes, los encaminadores o estaciones base, son fijos y cableados y las unidades móviles se conectan y se comunican

con su estación base más cercana dentro de su radio de alcance. Cuando el dispositivo móvil sale del alcance de su estación base, se produce una transferencia o *handoff* desde la estación base inicial hasta una nueva, de tal modo que el dispositivo móvil es capaz de comunicarse de manera transparente a través de la red. Otros ejemplos relevantes de redes inalámbricas son las redes de área local inalámbricas (WLAN, *Wireless Local Area Network*).

En segundo lugar se consideran las redes inalámbricas sin infraestructura. En esta clase de redes no existen encaminadores fijos y por tanto, los integrantes de la red deben conectarse espontánea y arbitrariamente entre sí. Dentro de este tipo de redes, se encuentran las redes *ad hoc*. Literalmente, las redes *ad hoc* son aquéllas que surgen de manera espontánea para cubrir una necesidad de comunicación con un propósito específico. Puesto que estas redes se forman de manera dinámica, gozan por definición de capacidad de autoconfiguración [4]. Los componentes de estas redes, también denominados nodos, funcionan como encaminadores que descubren y mantienen las rutas de otros nodos en la red, sin que exista un acuerdo previo en cuanto al papel que cada nodo debe asumir. Por el contrario, cada nodo toma sus decisiones autónomamente basándose en la situación de la red. Por ejemplo, dos ordenadores personales equipados con tarjetas de red inalámbricas pueden configurar una red independiente siempre y cuando cada uno de los equipos esté dentro del radio de cobertura del otro. Otros campos de aplicación incluyen las operaciones de emergencia de búsqueda y salvamento, congresos o convenciones en los que los participantes desean compartir información de manera inmediata y la adquisición de datos en terrenos inhóspitos [1, 2]. La Figura 1.1 muestra de modo simplificado la arquitectura de una red celular frente a la de una red *ad hoc* inalámbrica. En la Figura 1.1(a) se representan tres estaciones base que se comunican con sus correspondientes nodos móviles. Por el contrario, en la Figura 1.1(b) se exhibe una red *ad hoc* inalámbrica en la que los nodos no sólo pueden ser dispositivos móviles, sino que también pueden formar parte otros elementos como un punto de acceso.

Las redes *ad hoc* inalámbricas son un tema de gran interés, desde el punto de vista de la investigación y del mundo empresarial, por la creciente demanda de conectividad *anywhere and anyway*¹, es decir, con o sin infraestructura. Mientras que las redes tradicionales se componen de nodos fijos cableados, las redes *ad hoc* inalámbricas pueden describirse genéricamente como redes inalámbricas multi-salto compuestas de nodos potencialmente móviles. Se puede definir una red *ad hoc* inalámbrica como una red en la que todos los nodos se conectan a través de enlaces inalámbricos sin existir un nodo central o dominante, estando todos al mismo nivel jerárquico [5]. Las redes *ad hoc* permiten encadenar nodos independientes, limitados en potencia de transmisión y procesamiento para proporcionar una mayor cobertura de red y capacidad de cómputo. Igualmente,

¹en cualquier lugar y de cualquier manera

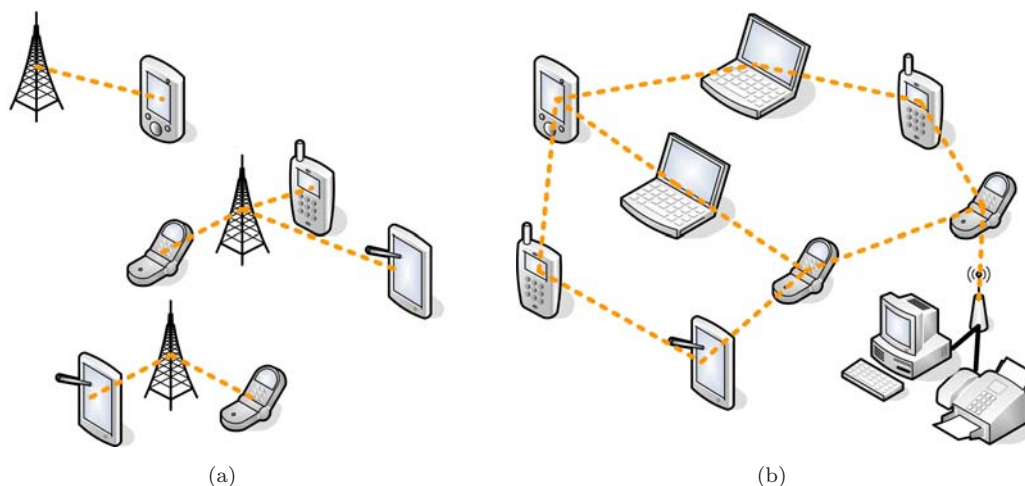


FIGURA 1.1: (a) Modelo simplificado de la arquitectura de una red celular; (b) Modelo simplificado de la arquitectura de una red *ad hoc*

los nodos también se pueden conectar a una red troncal fija a través de una pasarela dedicada², permitiendo servicios IP (*Internet Protocol*) en áreas donde los servicios de red no son accesibles debido a la carencia de infraestructura. Todas estas ventajas hacen de la redes *ad hoc* una opción más que atractiva en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas [1]. Se trata, en definitiva, de un prometedor campo de investigación, en el que en la actualidad están surgiendo nuevos escenarios de comunicación, como las redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Network*) [6]. Las redes de sensores inalámbricas son redes que constan de nodos individuales capaces de interactuar con su entorno monitorizando o controlando parámetros físicos. Estos nodos colaboran entre sí empleando la comunicación inalámbrica, ya que, debido a su limitada capacidad computacional, un nodo no es capaz de llevar a cabo las tareas por sí solo [4].

Con el fin de comprender las tendencias en tecnologías inalámbricas y atisbar por qué las redes *ad hoc* inalámbricas están preparadas para desempeñar un papel fundamental en la evolución de las redes inalámbricas del futuro, se hace necesaria una revisión sucinta de las generaciones tecnológicas en este campo. Se puede afirmar que la historia comercial de las redes inalámbricas comenzó en torno al año 1980 con la primera generación o 1G, en la que los teléfonos eran analógicos. Estos dispositivos sólo se podían emplear dentro de un país, ya que existían diferentes estándares, dependiendo del área geográfica mundial. El despliegue de la segunda generación, 2G, surgió en la década de los 90, añadiendo fax, datos y capacidades de mensajería al servicio de voz tradicional. Sin embargo, tampoco se adoptó como un estándar homogéneo mundial. Recientemente, 2G se ha extendido a 2.5G, con el fin de mejorar el soporte de transmisión de datos de baja velocidad. Actualmente, los esfuerzos se focalizan en la transición desde 2G hacia 3G, con la que se adoptará un estándar global y con capacidades de *roaming* en

²Encaminador con propósito específico

todo el planeta, además de incrementar considerablemente el ancho de banda. Desafortunadamente, a pesar de las grandes expectativas puestas sobre 3G, estas redes están experimentando dificultades en ser desplegadas y en el cumplimiento de las prestaciones que se esperaba de ellas debido a las limitaciones de la arquitectura de la red. Por ello, ya se está gestando la nueva generación 4G, una red global basada en una aproximación de sistemas abiertos³. Los dos principales objetivos de 4G son integrar diferentes tipos de tecnologías inalámbricas con líneas cableadas de manera transparente y la convergencia de voz, contenido multimedia y datos sobre una sóla red troncal IP. Las redes *ad hoc* inalámbricas móviles encajan en este contexto puesto que se espera que sean una de las partes más importantes de la arquitectura de las redes 4G [1].

Gran parte de la investigación realizada en el campo de las redes *ad hoc* inalámbricas se ha centrado en los protocolos de encaminamiento [6]. La razón principal por la que se hace necesario desarrollar protocolos eficientes para este tipo de redes es que la experiencia y el conocimiento adquiridos con las redes fijas no son aplicables a las redes *ad hoc* inalámbricas. Mientras que en las redes fijas los enlaces son fiables y el encaminamiento se puede estudiar independientemente de las características físicas de la red, las redes *ad hoc* inalámbricas no admiten esa asunción básica [5]. Además, la naturaleza de las redes *ad hoc* inalámbricas conlleva cambios frecuentes e imprevisibles en la topología de la red, añadiendo complejidad al encaminamiento. Estas nuevas dificultades, antes inexistentes en las redes cableadas, junto con la importancia crítica de los protocolos de encaminamiento para establecer la comunicación entre nodos, hacen que el área del encaminamiento sea una de las más activas en la investigación de las redes *ad hoc* inalámbricas [2]. El propósito del presente trabajo se enmarca aquí, ya que ofrece un estudio sobre las prestaciones de uno de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* inalámbricas más ampliamente extendidos [7]. Concretamente, se busca evaluar las prestaciones del protocolo cuando el número de componentes de la red es elevado. Puesto que el despliegue de la red real es inabarcable dado el alto número de nodos, es necesario hacer un estudio previo que sirva como base para trabajos reales posteriores. Por ello, la evaluación del protocolo de encaminamiento se realiza mediante herramientas de simulación que modelan el sistema real cuyo comportamiento se pretende analizar.

1.2. Objetivos

Este proyecto supone la continuación del trabajo realizado en [8]. Además, el estudio del encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas es una de las líneas de investigación

³Sistemas que proporcionan alguna combinación de interoperabilidad, portabilidad y uso de estándares abiertos. Un estándar abierto es una especificación disponible públicamente para lograr una tarea específica

principales del departamento que coordina este proyecto, el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos.

El principal cometido de este trabajo consiste en evaluar las prestaciones de un protocolo de encaminamiento para redes *ad hoc* inalámbricas cuando el número de nodos es elevado, comprobando cómo se modifican sus prestaciones según varían los parámetros que caracterizan la red. Este propósito fundamental puede a su vez descomponerse en los objetivos parciales enumerados a continuación:

- Estudio teórico sobre las redes *ad hoc* inalámbricas y sus protocolos de encaminamiento.
- Familiarización con las herramientas de simulación.
- Determinación de los parámetros a considerar para la generación de datos.
- Implementación y ejecución de los bancos de experimentos.
- Obtención y filtrado de datos.
- Generación y análisis de resultados.
- Extracción de conclusiones.
- Redacción de la memoria.

1.3. Metodología y Planificación

Para llevar el presente proyecto a buen término es necesario establecer y consumir una secuencia lógica de fases, ilustrada en la Figura 1.2. El desarrollo de este trabajo se puede dividir *grosso modo* en cuatro etapas: preparación, obtención de datos, análisis de resultados y redacción de la memoria. Debido a la generalidad de estas fases, éstas se pueden descomponer a su vez en diferentes subtarefas que se detallan en las siguientes líneas. En primer lugar, durante la fase de preparación, se acudió a la bibliografía para asimilar el entorno teórico de las redes *ad hoc* inalámbricas y los protocolos de encaminamiento a ellas ligados para completar así la fase de documentación. Tras ello, se adecuó el entorno de trabajo y se ganó experiencia con la herramienta de simulación empleada. En segundo lugar, durante la fase de generación de datos, fue preciso preparar los escenarios de prueba, lanzar simulaciones y recoger sus resultados. Posteriormente, durante la fase de análisis de resultados, se filtraron dichos datos, desechando toda información

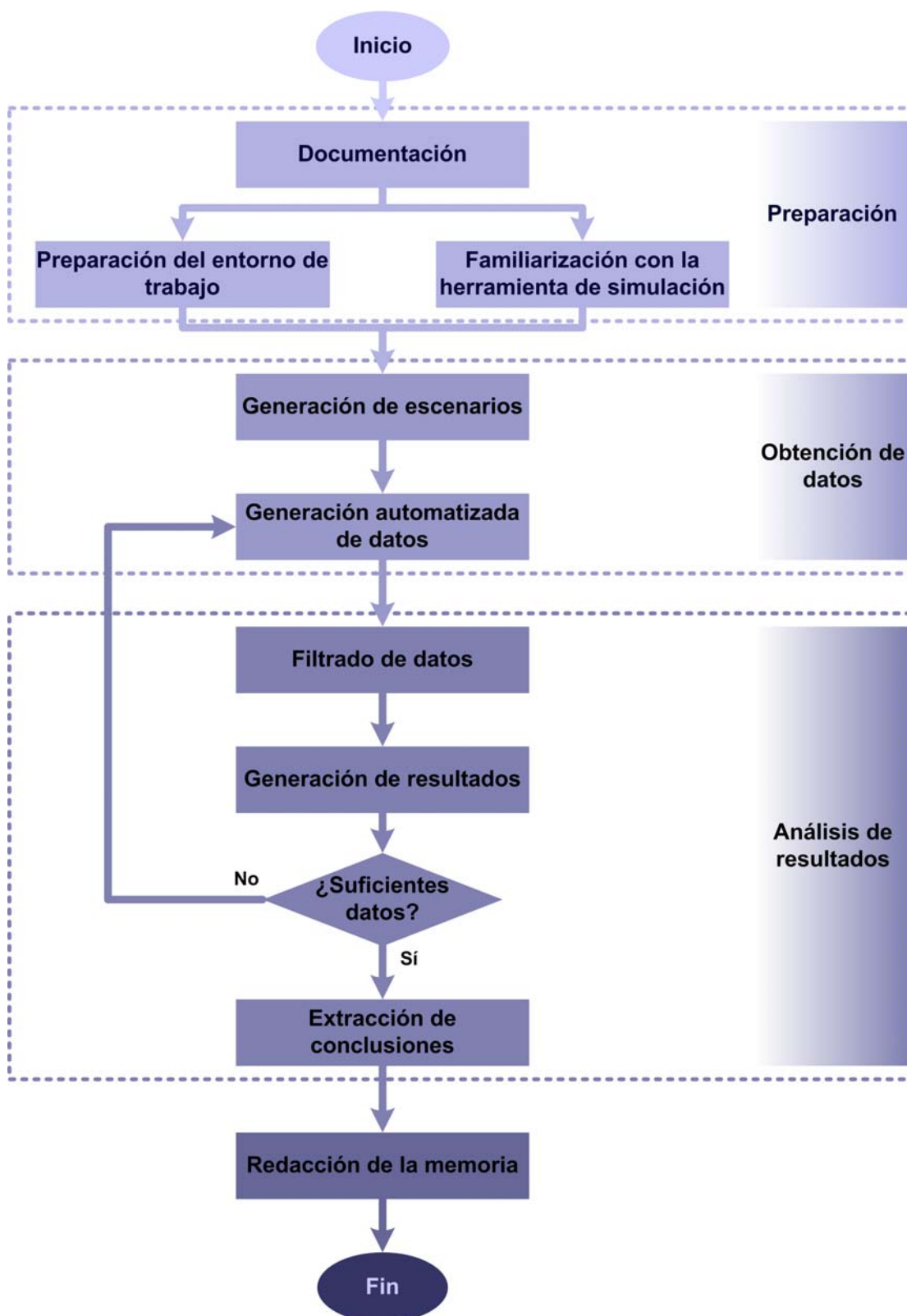


FIGURA 1.2: Diagrama de bloques de la metodología seguida para la realización de un estudio comparativo de un protocolo de encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas

innecesaria. Sólo tras postprocesar esta información obtenida, y elaborar resultados analizables, fue posible evaluar las prestaciones del protocolo. Una vez concluida la fase de extracción de conclusiones se pasó a la fase de redacción del presente documento.

La planificación seguida para la consecución del proyecto se muestra en la Figura 1.3, que plasma la extensión temporal de las fases anteriormente comentadas a modo de diagrama de Gantt, donde el duración de las tareas se expresa en semanas. Las tres últimas tareas se solapan en el tiempo, ya que para su ejecución no fue necesario seguir un flujo secuencial. Como se puede percibir, las tareas más prolongadas son la obtención de datos y el análisis de resultados, debido al gran volumen de datos necesarios para la realización de este estudio.

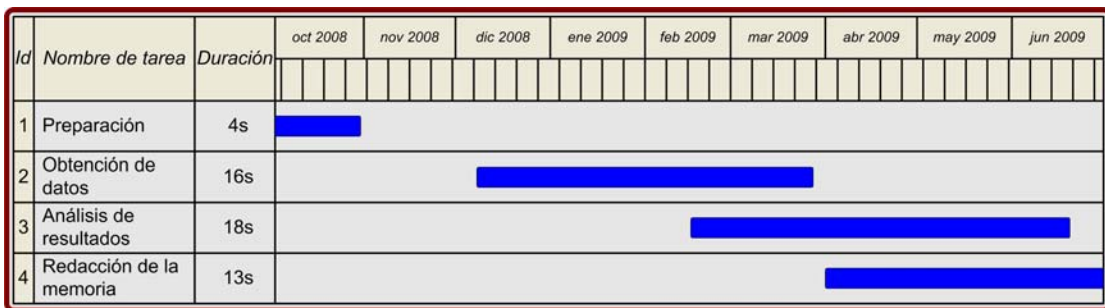


FIGURA 1.3: Planificación

1.4. Organización de la memoria

La presente memoria se estructura en siete capítulos, cuyos contenidos se ofrecen a continuación:

- El **Capítulo 1: Introducción y objetivos** presenta el marco científico al que se adhiere el proyecto, plantea los objetivos a cumplir y la metodología y planificación empleada.
- El **Capítulo 2: Redes ad hoc inalámbricas** revisa los contenidos teóricos sobre este tipo de redes, prestando especial atención al área de encaminamiento. Ofrece una innovadora clasificación de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* inalámbricas más populares y recoge un profuso estudio comparativo sobre los mismos.
- El **Capítulo 3: Protocolo de encaminamiento AODV** profundiza en los mecanismos sobre los que se apoya este protocolo ya que se trata del protocolo cuyas prestaciones se ponen bajo estudio.

-
- El **Capítulo 4: Entorno de trabajo** describe en primer lugar los recursos empleados a nivel de red, *hardware* y *software*. Posteriormente presenta una breve comparativa de los simuladores de red más habituales y subraya las características de la herramienta elegida.
 - El **Capítulo 5: Evaluación de la eficiencia de encaminamiento y descripción de los experimentos** define formalmente la medida empleada para evaluar la eficiencia de encaminamiento e ilustra el proceso de la generación de datos.
 - El **Capítulo 6: Resultados** detalla la metodología seguida para la evaluación de la eficiencia de encaminamiento y ofrece la interpretación de los resultados obtenidos.
 - El **Capítulo 7: Conclusiones y líneas de trabajo futuras** expone las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos y propone varios derroteros que dan continuidad a este proyecto.

Capítulo 2

Redes *ad hoc* inalámbricas

Este capítulo ofrece el estado del arte de las redes *ad hoc* inalámbricas, presentando el área de conocimiento en la que se enmarca este proyecto. En la Sección 2.1 se explica qué se entiende por este tipo de redes y se enumeran sus aplicaciones más comunes. En la Sección 2.2, se define, en primer lugar, el encaminamiento, especialmente aplicado a las redes *ad hoc* inalámbricas. En segundo lugar, se presenta una clasificación innovadora de los protocolos más empleados en este tipo de redes y finalmente, se recoge un profuso estudio comparativo sobre los mismos que pone de manifiesto las diferencias más relevantes que existen entre ellos.

2.1. Introducción

A diferencia de las redes cableadas tradicionales, en una red *ad hoc* inalámbrica, cada uno de los componentes o nodos funciona simultáneamente como estación y como encaminador. Para que cada nodo sea capaz de comunicarse con el resto, es necesario que mantenga información de la red a la que pertenece y disponga de algún algoritmo que rijan el envío y recepción de paquetes. El conjunto que forma el algoritmo de encaminamiento y la información sobre las condiciones de la red recibe el nombre de protocolo de encaminamiento. Los protocolos de encaminamiento en redes *ad hoc* deben adaptarse de manera rápida y correcta a los frecuentes e imprevisibles cambios de la topología de la red, haciendo un uso mínimo de memoria, potencia de transmisión y ancho de banda.

2.1.1. Definición

El término *ad hoc* es una locución latina que significa literalmente «para esto». El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define las redes *ad hoc* como aquellas redes compuestas únicamente por estaciones, estando cada una de ellas dentro del rango de cobertura de alguna de las otras a través de un medio inalámbrico. Una red *ad hoc* se crea típicamente de manera dinámica y su principal singularidad es su limitación tanto temporal como espacial. Estas restricciones permiten crear y disolver redes de manera suficientemente sencilla y práctica [9]. Formalmente, una red *ad hoc* inalámbrica se puede parametrizar considerando los siguientes calificativos [1]:

Inalámbrica: Los nodos se comunican a través de medios de transmisión no guiados (radio, infrarrojos, etc.).

Ad hoc: La red es temporal y se establece dinámicamente de manera arbitraria por un conjunto de nodos según se necesita.

Autónoma y sin infraestructura: La red no depende de ninguna infraestructura establecida ni de ninguna administración centralizada. Cada nodo opera de manera distribuida de par a par¹, actúa como un encaminador independiente y genera datos por sí mismo.

Multisalto: No se necesitan encaminadores dedicados, cada nodo actúa como un encaminador y reenvía paquetes hacia otros nodos para facilitar el intercambio de información entre los integrantes de la red.

Adicionalmente, los nodos pueden estar dotados de movilidad. En este caso, estas redes reciben el nombre de redes *ad hoc* móviles (MANETs, *Mobile Ad hoc NETWORKS*). La topología en este tipo de redes es dinámica debido al constante movimiento de los nodos participantes, haciendo que los patrones de comunicación entre los miembros de la red evolucione constantemente.

En definitiva, las redes *ad hoc* inalámbricas eliminan las restricciones impuestas por las infraestructuras fijas, permitiendo a los dispositivos crear y adherirse a redes improvisadamente, haciéndolas adecuadas para adaptarse virtualmente a cualquier aplicación.

¹Entre entidades homólogas.

2.1.2. Aplicaciones

La cualidad más notable de las redes *ad hoc* es su flexibilidad. El hecho de que puedan establecerse en cualquier lugar y en cualquier momento sin infraestructura, administración o preconfiguración, las hace muy atractivas para un amplio rango de campos de aplicación. La Tabla 2.1 muestra una clasificación de las aplicaciones presentes y futuras de las redes *ad hoc*, así como de los servicios que ofrecen [1].

Aplicaciones	Servicios ofrecidos
Redes tácticas	Comunicaciones en operaciones militares Campos de batalla automatizados
Redes de sensores	Recogida de datos en tiempo real, generalmente altamente correlados en espacio y tiempo
Servicios de salvamento y emergencia	Operaciones de búsqueda y rescate Sustitución de redes con infraestructuras en caso de catástrofes naturales
Entornos comerciales	Comercio electrónico Acceso remoto a los registros de los cliente desde una base de datos centralizada Oficina móvil Servicios vehiculares
Redes para particulares y empresas	Redes de área local inalámbricas (WLAN, <i>Wireless Local Area Network</i>) para hogares u oficinas Redes de área personal (PAN, <i>Personal Area Network</i>)
Aplicaciones educativas	Configuración de clases virtuales Configuración de comunicaciones <i>ad hoc</i> en reuniones, conferencias y congresos
Ocio	Juegos multi-usuario Robots mascota Acceso a Internet en exteriores
Servicios de localización	Servicios de seguimiento Servicios de información

TABLA 2.1: Campos de aplicación de las tecnologías inalámbricas *ad hoc*

2.2. Encaminamiento *ad hoc*

En esencia, el proceso de encaminamiento se define como el acto de transmisión de información desde una fuente u origen hasta un destino, esto es, extremo a extremo [10]. El encaminamiento se asimila como el proceso de selección de caminos desde un origen hasta un destino dentro de una red. Un protocolo de encaminamiento para redes *ad hoc* permite que la red se organice completamente por sí sola, y su objetivo principal es el establecimiento correcto y eficiente de rutas entre un par de nodos, de tal modo que los mensajes sean entregados de manera fiable y a tiempo. La construcción de rutas debe producirse con una mínima sobrecarga en las cabeceras de los paquetes de control y un mínimo consumo de ancho de banda [2].

Las consideraciones que han de tenerse en cuenta en el diseño y estudio de los nuevos protocolos de encaminamiento incluyen [1]:

- Simplicidad y facilidad de implementación.
- Convergencia² rápida de rutas, libres de bucles y óptimas. Incluso, puede que sea posible establecer diferentes rutas entre el mismo par de nodos origen y destino, para aumentar la robustez.
- Naturaleza distribuida y ligera, de tal forma que, ante cambios en la topología y en los patrones de tráfico, la reacción del protocolo implique una mínima sobrecarga de cabeceras.
- Eficiencia en términos de ancho de banda, potencia de transmisión y computación, con una sobrecarga de cabeceras mínima.
- Escalabilidad, de tal forma que si la red aumenta significativamente en número de nodos, no se degraden las prestaciones.
- Seguridad a nivel de confidencialidad, control de acceso y denegación de ataques de servicio producidos por nodos maliciosos.
- Capacidad de soportar requerimientos de calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*). La garantía de calidad de servicio es esencial para la entrega a tiempo de tráfico multimedia.

2.2.1. Clasificación de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* inalámbricas

Se han propuesto numerosos protocolos de encaminamiento con la finalidad de cubrir las diferentes necesidades en función de los distintos entornos y condiciones de tráfico. La gran variedad de protocolos existentes hace que existan diversos criterios para su clasificación, que a su vez reflejan los aspectos más importantes considerados para su diseño. Las fuentes consultadas [1, 2, 11–18] proponen diferentes catalogaciones que en muchos casos son incompletas, ya que no contemplan todos los criterios existentes. Es por esto por lo que se ha considerado oportuno realizar un estudio pormenorizado de los protocolos que más frecuentemente aparecen en esta literatura para confeccionar una nueva clasificación que incorpore todos los criterios mencionados. Para complementar todo ello, se ha elaborado una gráfica que, a modo de resumen, ilustra esta renovada catalogación y que se muestra en la Figura 2.1. Las siguientes páginas desgranarán esta figura, describiendo las características estudiadas para esta nueva clasificación.

²Capacidad de recuperación ante los fallos de enlace

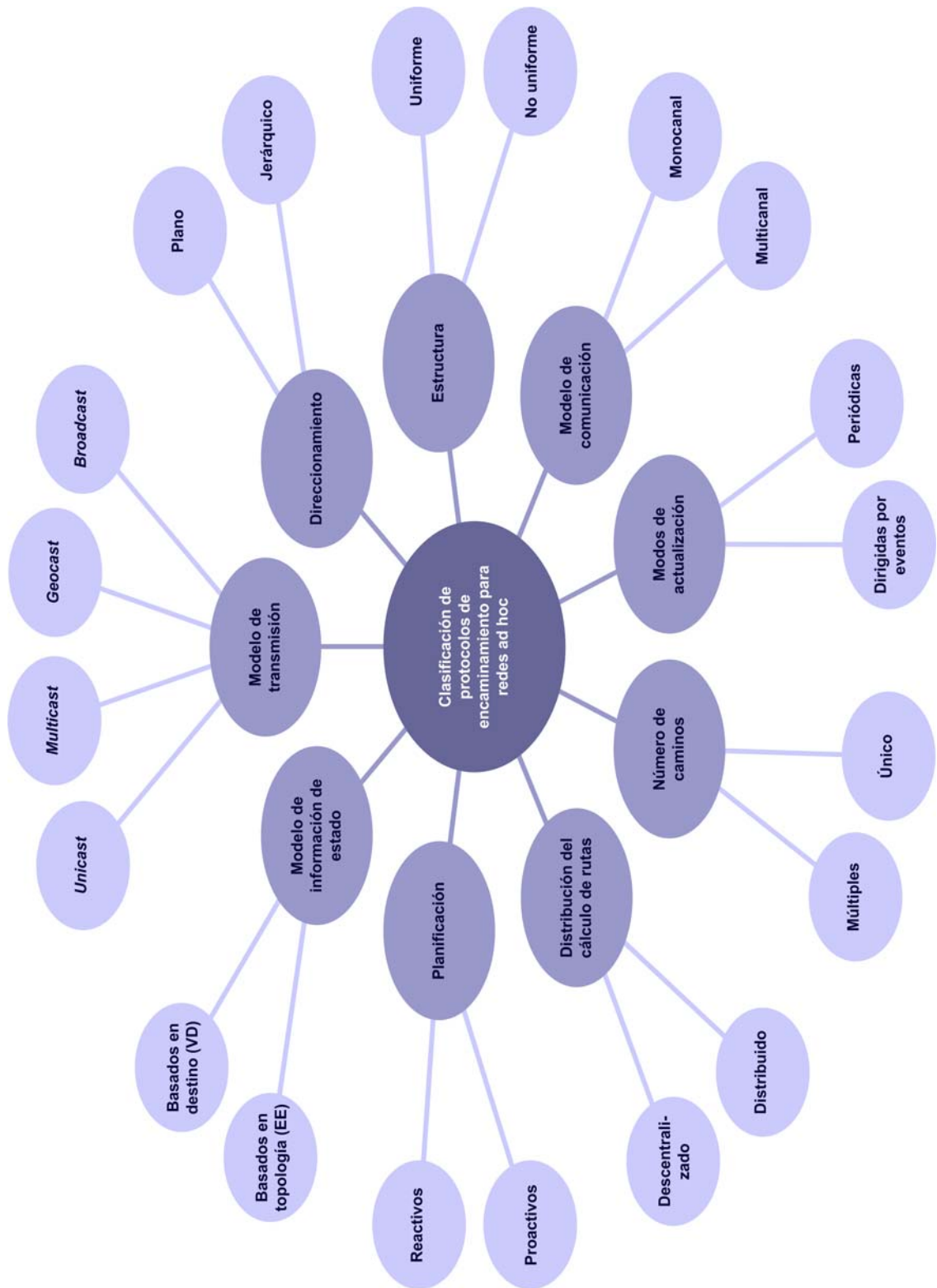


FIGURA 2.1: Clasificación de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc*

2.2.1.1. Planificación

El criterio de planificación supone la clasificación más ampliamente empleada en la literatura y atiende al momento en el que se calcula la ruta desde un nodo origen hasta un nodo destino. Mientras que en los protocolos proactivos se conserva la información actualizada en todo momento, en los reactivos se busca la ruta hacia el destino sólo cuando surge la necesidad de establecer una comunicación [1, 2, 12–18].

- **Protocolos de encaminamiento proactivos.** Mantienen información consistente y actualizada desde cada nodo hacia todos los demás, propagando proactivamente actualizaciones de rutas. Puesto que la información de encaminamiento se suele mantener en tablas, es común referirse a estos protocolos como protocolos dirigidos por tabla (*table-driven routing protocols*). Se diferencian entre ellos en el número de tablas necesarias y en los métodos utilizados para difundir los cambios de la red.
- **Protocolos de encaminamiento reactivos.** Establecen una ruta hacia el destino sólo cuando se precisa, generalmente iniciada por el nodo origen a través de un procedimiento de descubrimiento de rutas. Una vez que se ha establecido la ruta, el nodo se ocupa de mantenerla hasta que ya no se necesita o caduca. También se conocen como protocolos de encaminamiento iniciados en origen bajo demanda (*source-initiated demand driven*).

2.2.1.2. Modelo de información de estado

Al igual que ocurre en los protocolos de encaminamiento de las redes cableadas tradicionales, los protocolos *ad hoc* pueden clasificarse atendiendo a cuál es la información mantenida en cada nodo y cuáles son los destinatarios de esa información, distinguiendo entre la familia de estado de enlaces y la familia de vector de distancias [13, 14, 16, 18].

- **Basados en topología o de estado de enlaces (EE).** La información de encaminamiento se transmite en forma de paquetes de estado de enlaces (LSP, *Link State Packet*). Los paquetes que envía cada nodo incluyen información acerca de sus nodos vecinos y cualquier cambio en alguno de sus enlaces provoca inmediatamente la inundación de la red. Cada nodo es así capaz de reconstruir y mantener un mapa de la topología global de la red a través de los LSP que recibe, pudiendo calcular por sí mismo las rutas hacia cualquier otro nodo. El principal inconveniente es que se puede producir sobrecarga si la naturaleza de la red es altamente dinámica. Un caso particular son los protocolos basados en asociatividad de estado de

enlaces, en los que los nodos mantienen información sobre el nivel de señal recibida en periodos espacio-temporales. Otra modalidad consiste en mantener información de estado de enlaces nivel de enlace, intercambiando información de bajo nivel.

- **Basados en destino o de vector de distancias (VD).** Cada nodo mantiene una estructura de datos a modo de *array* denominada vector de distancias en la que se incluye cierta información. Los campos que como mínimo deben aparecer en este vector son la tripleta formada por la dirección IP del nodo destino, la dirección IP del siguiente salto³ y la distancia más corta para alcanzarlo. Cada componente de la red intercambia periódicamente sus vectores de distancias con sus nodos vecinos. Cuando un nodo recibe los vectores de distancias de los nodos que le rodean, calcula de nuevo las rutas y actualiza su propio vector de distancias. La principal desventaja es la lenta convergencia y la tendencia a crear bucles. Un caso particular son los protocolos basados en inversión de enlaces (IE), en los que cuando se detecta un fallo en un enlace, es el nodo afectado el que se encarga de encontrar una ruta hacia el origen.

2.2.1.3. Modelo de transmisión

El modelo de transmisión atiende qué destinatarios deben recibir los paquetes. Cabe pensar que en un canal inalámbrico, todos los nodos dentro del rango de cobertura del nodo origen recibirán los paquetes, estableciendo un modelo de comunicación *broadcast*. No obstante, se pueden establecer otros mecanismos para restringir el grupo de destinatarios. De hecho, el modelo de comunicación más ampliamente extendido para la transmisión de mensajes de control es el método *unicast* [14, 16, 18].

- ***Unicast.*** Se refiere a la comunicación uno a uno, es decir, de un nodo origen a un único nodo destino. La mayor parte de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* se ubica dentro de esta categoría, ya que se trata del modo de operación normal en cualquier red.
- ***Multicast.*** Este modelo de comunicación se emplea cuando un nodo necesita enviar información idéntica a varios destinos. Un nodo puede incorporarse o disgregarse de un grupo *multicast* cuando lo desee, pero en contrapartida, los nodos deben mantener información adicional sobre los nodos que se adhieren o abandonan su grupo *multicast*. En este tipo de protocolos, se suele emplear la técnica de envío por inundación (*flooding*), por la que cuando un nodo recibe un paquete por un interfaz, lo reenvía por todos los interfaces salvo por el que le llegó.

³siguiente nodo al que debe enviar el paquete para llegar al nodo destino

- **Geocast.** Se trata de un caso particular de envío *multicast* que se utiliza para entregar paquetes a un grupo de nodos situados dentro de un área geográfica específica. Un nodo puede adherirse o abandonar un grupo *geocast* simplemente entrando o saliendo de esa área geográfica. Este tipo de protocolos facilita el procedimiento de descubrimiento de rutas al proporcionar información sobre la localización física de los nodos.
- **Broadcast.** Se trata del modo de operación básico en un canal inalámbrico, ya que cada mensaje emitido por un nodo en un canal inalámbrico es recibido por todos sus vecinos. Sin embargo, sólo algunos protocolos implementan este tipo de modelo de transmisión y siempre a modo de apoyo. Emplear exclusivamente el modo de transmisión *broadcast* no es prudente, ya que se consume un ancho de banda excesivo y en muchas ocasiones de forma innecesaria.

2.2.1.4. Direccionamiento

El direccionamiento hace alusión a la organización de la red en niveles jerárquicos lógicos, según todos los nodos estén al mismo nivel, dando lugar a un direccionamiento plano o no lo estén, originando un direccionamiento estratificado o jerárquico [15, 18, 19].

- **Plano.** No existe jerarquía en la red, todos los nodos están al mismo nivel. Si un nodo falla, no afecta a todos los demás.
- **Jerárquico.** Existen nodos de niveles superiores y nodos de niveles inferiores. Los primeros pueden clasificarse en nodos *clusterhead*, que gestionan la comunicación dentro de un *cluster* o agrupación, y nodos pasarela o *Gateway-Node*, responsables de la comunicación entre agrupaciones. Los nodos de niveles superiores devienen en un punto único de fallo, ya que si uno de estos nodos falla, perjudica todos sus nodos subordinados.

2.2.1.5. Estructura

La estructura de la de la red está relacionada con la uniformidad de los roles que desempeñan los nodos que la integran. Mientras que unos protocolos tratan a todos los nodos de igual modo, estructurándolos uniformemente, otros hacen distinciones entre diferentes nodos de la red, estableciendo una estructura no uniforme [13, 14, 16, 17].

- **Uniforme.** Todos los nodos cumplen idénticas funciones, enviando mensajes de control y respondiendo a los mismos de igual modo.

- **No uniforme.** Algunos nodos ejercen papeles específicos en cuanto al tratamiento de la información de encaminamiento. Dentro de los protocolos no uniformes, se puede distinguir entre los que hacen uso del método de selección de vecinos, si los nodos centran su actividad de encaminamiento sólo en algunos de sus vecinos; y los que emplean el método de particionamiento, por el que la red se divide lógicamente en subredes.

2.2.1.6. Modelo de comunicación

Dependiendo del uso del espectro, los protocolos de encaminamiento en redes *ad hoc* se pueden catalogar según la tecnología de acceso al medio empleada y a los mecanismos para compartir dicho medio de transmisión. Se trata de una clasificación que atiende a características de nivel de enlace, distinguiendo entre modelos de comunicación multicanal y monocanal [1, 13, 16].

- **Multicanal.** Son protocolos de bajo nivel que, además de funcionalidad de encaminamiento, incorporan mecanismos para la asignación de canal. Se suelen emplear en redes basadas en las técnicas de reparto del canal de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) y de acceso múltiple por división de código (CDMA, *Code Division Multiple Access*).
- **Monocanal.** La mayoría de los protocolos asumen que los nodos se comunican sobre un único canal lógico inalámbrico y comúnmente emplean la técnica de acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access, Collision Avoidance*).

2.2.1.7. Modos de actualización

La información de encaminamiento necesita diseminarse por la red para asegurar que la información sobre el estado del canal y la topología de la red se mantiene actualizada en los nodos. Según cuándo se difunde esta información, se puede distinguir entre protocolos que envían actualizaciones periódicamente, protocolos que activan las actualizaciones cuando se produce un evento, y protocolos que emplean una mezcla de ambas técnicas [15, 18, 20].

- **Actualizaciones periódicas.** Los nodos distribuyen la información de encaminamiento cada cierto periodo fijo de tiempo. Las actualizaciones periódicas simplifican los protocolos y sobre todo facilitan que los nuevos nodos que se adhieren a la red aprendan la topología y el estado de la misma. Sin embargo, si el periodo entre

actualizaciones es demasiado alto, la información no siempre será válida, ya que los cambios en la red no serán detectados inmediatamente. Por el contrario, si el periodo es excesivamente pequeño, se enviará un número de mensajes considerable, consumiendo un ancho de banda excesivo.

- **Actualizaciones dirigidas por eventos.** Cuando un nodo detecta un evento, tal como el fallo de un enlace o la aparición de un nuevo enlace, envía un paquete de actualización en modo *broadcast* para difundir el nuevo estado de la red. En contrapartida, si la naturaleza de la red es altamente dinámica, se deberán enviar abundantes paquetes de actualización, degradando la red. Ocasionalmente, puede incluso desencadenar la fluctuación de rutas.
- **Actualizaciones híbridas.** Algunos protocolos hacen un uso conjunto de las dos técnicas anteriores, creando un mecanismo denominado actualización híbrida. Por ejemplo, en un protocolo con modelo de información de estado basado en destino, un nodo puede difundir su vector de distancias periódicamente y si descubre que un enlace ha fallado, distribuir un mensaje de manera inmediata.

2.2.1.8. Número de caminos buscados

La mayoría de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* se limitan a buscar una única ruta desde un nodo origen hasta un nodo destino, pero otros descubren varios caminos hacia el mismo nodo destino, de tal forma que el nodo origen, atendiendo a diferentes criterios, puede elegir el que considere más oportuno [15, 18].

- **Único camino.** Los protocolos que hallan una sola ruta permiten un ahorro en el almacenamiento de la información y la simplificación del algoritmo de búsqueda.
- **Múltiples caminos.** Los protocolos de encaminamiento que buscan múltiples rutas son más robustos y confiables, ya que cuentan a su favor con una rápida recuperación ante fallos de enlaces. Además, el encaminamiento con rutas múltiples ocasiona un mayor rendimiento, puesto que el nodo origen, al disponer de varias rutas hacia el destino, puede realizar reparto de carga.

2.2.1.9. Método de cálculo de rutas

En función de cómo y dónde se calcula una ruta, se definen dos categorías de protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc*. El cálculo de rutas puede realizarse en cada nodo de manera independiente o bien puede llevarse a cabo de forma cooperativa entre varios nodos [18].

- **Cálculo descentralizado.** Cada nodo mantiene información global y completa sobre la topología de la red, siendo capaz de computar una ruta hacia cualquier nodo destino cuando lo desee.
- **Cálculo distribuido.** Cada nodo de la red mantiene sólo información local sobre la topología de la red. Cuando un nodo necesita descubrir el camino hacia un destino, varios nodos deben colaborar para calcular la ruta.

2.2.2. Estudio comparativo

Con el fin de ofrecer una perspectiva global sobre el panorama actual de los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc*, se ha elaborado un estudio comparativo de los protocolos más representativos. Para la confección de esta revisión, se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. **Elección de los protocolos bajo análisis.** La elección de los protocolos bajo estudio se ha determinado en función de su popularidad, escogiendo aquellos que aparecen en todas o la mayoría de las fuentes consultadas [2, 8, 12, 13, 15–18, 21–23].
2. **Revisión de documentos.** Se han examinado los artículos y publicaciones originales en los que se describen los protocolos elegidos [20, 24–36], así como otras referencias adicionales [19, 37, 37–39].
3. **Elaboración de la información extraída.** Se han elaborado las Tablas 2.2 y 2.3 con el fin de mostrar de manera resumida y estructurada la información obtenida.

Existe un gran número de protocolos para redes *ad hoc* inalámbricas. Esa variedad se debe a que cada protocolo posee ciertas particularidades que lo hacen apropiado para cubrir las necesidades de los diferentes escenarios y condiciones de tráfico que se pueden dar en este tipo de redes. En este estudio se comparan los protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* escogidos atendiendo a esas características distintivas, construyendo para ello las Tablas 2.2 y 2.3. La primera de ellas reúne los protocolos proactivos elegidos, la segunda concentra los protocolos reactivos. Las ocho primeras filas definen cada protocolo según la clasificación recogida en la Sección 2.2.1. Las tres filas siguientes señalan para qué tipo de red está indicado cada protocolo, considerando conceptos como la **escalabilidad**, mencionada anteriormente, y que se define como la propiedad de los protocolos a adaptarse al crecimiento de la red [40, 41]. Las tres filas posteriores hacen alusión a qué información se almacena, se envía y se recibe. El

término altura de los vecinos se refiere a la estructura de datos que se intercambia en los algoritmos de IE. Las cuatro filas siguientes se refieren a términos relacionados con la complejidad, el uso de ancho de banda y la longitud de los mensajes de control. La **complejidad de almacenamiento** se define como el tamaño de almacenamiento que cada nodo necesita para mantener la información necesaria. La **complejidad temporal** es el número de pasos necesarios para realizar una operación del protocolo [12, 18, 42–44]. Por último, el **consumo de ancho de banda** depende del número de mensajes necesarios para realizar una operación del protocolo [18]. Todos estos parámetros están expresados en notación de Landau [45]. La notación de Landau, denotada por $O()$, permite describir el comportamiento asintótico de una función cuando su argumento tiende a un valor particular o a infinito, generalmente en términos de funciones más simples. La notación de Landau permite expresar funciones de manera simplificada, prestando atención sólo a su tasa de crecimiento, de tal forma que diferentes funciones se pueden representar bajo la misma notación si su tasa de crecimiento es idéntica. Formalmente, la notación de Landau se define a partir de dos funciones reales, $f(x)$ y $O(g(x))$, de tal manera que: $f(x) = O(g(x))$ cuando $x \rightarrow \infty$. Los símbolos empleados en esta notación asintótica se presentan a continuación:

N : Número total de nodos en la red.

M : Número medio de nodos en una agrupación o *cluster*.

A : Grado de un nodo, esto es, número de nodos adyacentes o primeros vecinos⁴.

\bar{A} : Grado medio de un nodo.

D : Diámetro de la red.

D_d : Número máximo de destinos deseados en el caso de protocolos que buscan múltiples caminos.

W : Diámetro del camino por el que se transmite el paquete de respuesta.

Y : Número total de nodos que forman el camino por donde se transmite el paquete de respuesta.

Seguidamente, se presentan otros parámetros que no son agrupables bajo ninguna categoría y cuyo significado conviene aclarar. En los protocolos con **encaminamiento en origen**, se indica el camino completo en la cabecera de los paquetes de control, de tal modo que los nodos intermedios sólo se limitan a reenviarla [12, 18]. La **reconfiguración de rutas** apunta a la capacidad del protocolo para actuar ante fallos de enlace [2, 15].

⁴ nodos adyacentes, esto es, nodos bajo su radio de cobertura

Los mensajes *hello*, también denominados mensajes *beacon*, son aquéllos mensajes que los nodos intercambian para informar de su presencia en la red [2, 16–18]. El parámetro de **calidad de servicio** se refiere a si el protocolo dispone o puede incorporar mecanismos para garantizar una tasa de de bit constante que haga posible el intercambio de tráfico multimedia [2, 16]. Por su parte, la existencia de un **único punto de fallo** alude a la vulnerabilidad del protocolo, de tal modo que si falla un nodo, todos los demás se ven perjudicados [12]. Para finalizar, se incluye el acrónimo del protocolo antecesor, de quien hereda las características más significativas, el año de aparición de la primera propuesta, y las referencias originales y complementarias que han servido de referencia para este estudio.

2.2.3. Eficiencia de encaminamiento

Medir las prestaciones de un protocolo de encaminamiento para redes *ad hoc* no es una tarea trivial puesto que es necesario seleccionar aquellas variables que evalúan cualitativa y cuantitativamente sus bondades. No obstante, el Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet (IETF, *Internet Engineering Task Force*) ofrece en su documento [46] una lista de métricas cuantitativas que pueden ser empleadas para valorar las prestaciones de cualquier protocolo de encaminamiento:

- **Throughput⁵ y retardo.** Esta métrica se basa en medir la efectividad de encaminamiento de datos desde una perspectiva externa, realizando medidas estadísticas tales como media o varianza.
- **Tiempo de adquisición de rutas.** Esta medida calcula el tiempo necesario para establecer una ruta desde que se solicita, por lo que sólo tiene sentido en protocolos en los que el procedimiento de descubrimiento de rutas se realiza bajo demanda.
- **Porcentaje de entregas desordenadas.** Se trata de otra medida externa que mide el rendimiento del encaminamiento cuando algunas de las conexiones no están operativas. Es especialmente relevante desde el punto de vista de la capa de transporte.
- **Eficiencia.** Si la efectividad de encaminamiento de datos es la medida externa del rendimiento de una política de encaminamiento, la eficiencia es su medida interna.

A su vez, para evaluar estas prestaciones, no ha de olvidarse el contexto de red en el que trabaja el protocolo de encaminamiento bajo estudio. Los parámetros esenciales que definen un contexto de red incluyen [46]:

⁵volumen de trabajo o de información que fluye a través de un sistema.

Protocolos de encaminamiento proactivos para redes ad hoc									
Protocolo	DSDV	CGSR	WRP	GSR	OLSR	FSR	HSR		
Nombre	<i>Destination-Sequence-Vector Routing Protocol</i>	<i>Cluster-Head Gateway Switch Routing Protocol</i>	<i>Wireless Routing Protocol</i>	<i>Global State Routing Protocol</i>	<i>Optimized State Routing Protocol</i>	<i>Fisheye State Routing Protocol</i>	<i>Hierarchical State Routing Protocol</i>		
Planificación	Proactivo	Proactivo	Proactivo	Proactivo	Proactivo	Proactivo	Proactivo		
Modelo de información de estado	VD	VD	VD	E/E	E/E	E/E	E/E		
Modelo de transmisión	<i>Broadcast</i>	<i>Broadcast</i>	<i>Broadcast</i>	<i>Broadcast</i>	Inundación	<i>Broadcast</i>	<i>Broadcast</i>		
Direccionamiento	Plano	Jerárquico	Plano	Plano	Plano	Plano	Jerárquico		
Estructura	Uniforme	No uniforme	Uniforme	Uniforme	No uniforme	No Uniforme	No uniforme		
Modelo de comunicación	Monocanal	Multicanal	Monocanal	Monocanal	Monocanal	Mono/Multicanal	Monocanal		
Periodo de actualizaciones	Híbrido	Periódico	Híbrido	Periódico	Híbrido	Periódico con diferentes frecuencias	Híbrido		
Número de caminos buscados	Único	Único	Único	Único/Múltiples	Único/Múltiples	Único/Múltiples	Único		
Adecuación para redes altamente dinámicas	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí		
Adecuación para redes densas y extensas	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí		
Escalabilidad	Medida	Muy buena	Limitada	Buena	Buena	Muy mala	Buena		
Información almacenada	VD	VD, tabla miembros de la agrupación	Tabla distancias, tabla de encaminamiento, coste del enlace, MRL ^a	Topología completa	Topología completa	Topología completa	Topología jerárquica		
Información de las actualizaciones	VD	VD, tabla miembros de la agrupación	VD, lista de reservas	EE de todos los nodos	EE de los vecinos	EE del alcance de <i>fisheye</i>	EE virtual		
Destinatarios de las actualizaciones	Vecinos	Vecinos y nodo principal	Vecinos	Vecinos	Todos	Vecinos	Nodos de la agrupación		
Complejidad de almacenamiento	$O(N)$	$O(2N)$	$O(N \times A)$	$O(N \times A)$	$O(N \times A)$	$O(N \times A)$	$O(N \times \log_M N)$		
Complejidad temporal	$O(D)$	$O(D)$	$O(D)$	$O(D)$	$O(D)$	$O(D)$	$O(D)$		
Consumo de ancho de banda	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$		
Tamaño del paquete de control	$O(N)$	$O(N)$	$O(N + \bar{A})$	$O(N)$	$O(N)$	Determ. por el protocolo	$O(M)$		
Encaminamiento en origen	No	No	-	No generalmente	No generalmente	No generalmente	No		
Reconfiguración de rutas	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
Necesidad de mensajes <i>hello</i>	No	No	Sí	No	No	No	No		
Calidad de servicio	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí		
Único punto de fallo	No	Sí	No	No	No	No	Sí		
Antecesor	DBF	DSDV	DBF	-	-	GSR	-		
Año de la primera propuesta	1994	1997	1995	1998	1998	2000	1999		
Referencia original	[20]	[24]	[25]	[26]	[27]	[28]	[29]		
Referencias adicionales	-	[19]	-	-	[37, 38]	-	-		

TABLA 2.2: Estudio comparativo de los protocolos de encaminamiento ad hoc proactivos

^aLista de mensajes retransmitidos (*Message Retransmission List*)

Protocolos de encaminamiento reactivos para redes ad hoc						
Protocolo	DSR	AODV	TORA	ABR	SSA	
Nombre	<i>Dynamic Source Routing Protocol</i>	<i>Ad hoc On Demand Distance Vector Protocol</i>	<i>Temporally-Ordered Routing Algorithm Routing Protocol</i>	<i>Associativity-Based Routing Protocol</i>	<i>Signal Adaptive Routing Protocol</i>	
Planificación	Reactivo	Reactivo	Reactivo	Reactivo	Reactivo	
Modelo de información de estado	EE	VD	IE	EE Asociativo	EE a nivel 2	
Modelo de transmisión	<i>Unicast</i>	<i>Unicast/Broadcast</i>	<i>Broadcast</i>	<i>Unicast/Broadcast</i>	<i>Unicast</i>	
Direccionamiento	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	
Estructura	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Uniforme	
Modelo de comunicación	Monocanal	Monocanal	Monocanal	Monocanal	Monocanal	
Modos de actualización	Dirigido por eventos	Dirigido por eventos	Dirigido por eventos	Híbrido	Híbrido	
Número de caminos buscados	Múltiples	Múltiples	Múltiples-DAG ^a	Única	Única	
Adecuación para redes altamente dinámicas	No	Sí	Media	Sí	Sí	
Adecuación para redes densas y extensas	No	Sí	Media	Media	Sí	
Escalabilidad	Media	Buena	Muy buena	Buena	Muy buena	
Información almacenada	Rutas al destino deseado	Próximo salto al destino deseado	Altura de los vecinos	Información asociativa de los vecinos	Estabilidad de la señal, tabla de rutas	
Información de las actualizaciones	Error de ruta	Error de ruta	Altura de los nodos	Información vecinos o error de ruta	Error de ruta	
Destinatarios de las actualizaciones	Origen	Origen	Vecinos	Vecinos/Origen	Origen	
Complejidad de almacenamiento	$O(D)$	$O(D_d)$	$O(D_d \times \bar{A})$	$O(D + \bar{A})$	$O(D + \bar{A})$	
Complejidad temporal	$O(2D)$	$O(2D)$	$O(2D)$	$O(D + W)$	$O(D + W)$	
Consumo La información de encaminamiento necesita de ancho de banda	$O(2N)$	$O(2N)$	$O(2N)$	$O(N + Y)$	$O(N + Y)$	
Tamaño del paquete de control	$O(D)$	$O(D_d)$	$O(1)$	$O(D)$	$O(1)$	
Encaminamiento en origen	Sí	No	No	Sí	No	
Reconfiguración de rutas	Sí borrado de rutas, notificar a la fuente	Sí borrado de rutas, notificar a la fuente	Sí inversión de enlace, re-paración de enlace	Solicitud de <i>broadcast</i> local	Sí borrado de rutas, notificar a la fuente	
Necesidad de mensajes <i>hello</i>	No	Sí	No	Sí	Sí	
Calidad de servicio	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
Único punto de fallo	No	No	No	No	No	
Antecesor	-	DSDV	LMR	-	-	
Año de la primera propuesta	1996	1999	2001	1996	1996	
Referencia original	[30, 31]	[32, 33]	[34]	[35]	[36]	
Referencias adicionales	[39]	[39]	[37]	-	-	

TABLA 2.3: Estudio comparativo de los protocolos de encaminamiento ad hoc reactivos

^agrafo acíclico dirigido, (*Directed Acyclic Graph*)

- **Tamaño de la red.** Medido en número de nodos.
- **Conectividad de la red.** Grado medio de un nodo.
- **Tasa de cambio en la topología.** Velocidad a la que varía la topología de la red.
- **Capacidad de los enlaces.** Velocidad efectiva del enlace medida en *bits/segundo*.
- **Fracción de enlaces unidireccionales.** Cómo responde el protocolo cuando un porcentaje de los enlaces trabaja solamente en una dirección.
- **Patrones de tráfico.** Cómo se adapta el protocolo cuando el patrón no es uniforme.
- **Movilidad.** Cuándo y bajo qué circunstancias la correlación temporal y espacial afecta al rendimiento de un protocolo de encaminamiento.
- **Porcentaje y frecuencia de nodos no operativos.** Cómo responde el protocolo en presencia de nodos que dejan de estar activos o vuelven a estarlo tras un periodo de inactividad.

En las bibliografías consultadas [47–52] la eficiencia de encaminamiento se define en diferentes términos. A modo de ejemplo, cabe mencionar que en [47, 51] se evalúan cinco protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* atendiendo al *throughput*, retardo medio y sobrecarga de cabeceras en los paquetes de datos. En [48], se comparan cuatro protocolos en función del porcentaje de paquetes de datos entregados con éxito y el número y tamaño de los paquetes de control enviados a diferentes tasas de movilidad. En [52], se calcula la distancia de los caminos entre origen y destino computada en número de saltos. En consecuencia, y ante la ausencia de unanimidad en la concreción de eficiencia de encaminamiento, se recurre a la definición ofrecida en el trabajo previo realizado en [8]. Es éste se citan tres procedimientos para evaluar la eficiencia de encaminamiento y que son empleados en diferentes trabajos empíricos:

- **Competitive ratio.** Se define como el caso más desfavorable de la relación entre el coste de un algoritmo *on-line*⁶ y el coste del algoritmo óptimo. Esta definición se puede aplicar al problema del encaminamiento mediante el cociente del número de pasos que necesita un algoritmo para entregar un mensaje y la longitud del camino óptimo [53].
- **Path optimality.** Se refiere al cociente del número de saltos recorridos por un paquete enviado por un nodo origen hacia un nodo destino entre el número de saltos de la ruta óptima entre fuente y destino [54].

⁶algoritmos que toman decisiones parciales según llegan los datos.

- ***Path stretch.*** Se define como el cociente de la longitud real del camino recorrido entre el nodo origen y el nodo destino y la distancia que los separa [55].

Capítulo 3

Protocolo de encaminamiento AODV

El protocolo de encaminamiento AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) es el protocolo en el que se basa este estudio sobre la eficiencia de encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas compuestas por un alto número de nodos. El objetivo de este capítulo es revelar los detalles del protocolo para ofrecer una visión clara sobre su funcionamiento. Para comenzar, la Sección 3.1 presenta las características más significativas de este protocolo. A continuación, en la Sección 3.2, se detalla cuál es la información en la que el protocolo se apoya para ejecutar el algoritmo de encaminamiento. Seguidamente, en la Sección 3.3, se describe el proceso de descubrimiento de caminos, distinguiendo entre la fase de formación del camino de vuelta y la fase de la formación del camino de ida. En la Sección 3.4 se introducen los mecanismos para mantener las rutas conocidas. En la Sección 3.5 se resume el alcance de los mensajes de control del protocolo AODV intercambiados por los nodos. A continuación, en la Sección 3.6, se exponen algunos de los parámetros que concretan la implementación del protocolo AODV. Para finalizar, en la Sección 3.7, se ofrecen algunos aspectos característicos del protocolo.

3.1. Introducción

El protocolo de encaminamiento AODV fue proyectado en 1999 por Charles E. Perkins, del grupo de desarrollo avanzado de Sun Microsystems, y Elizabeth M. Royer, de la Universidad de California, Santa Barbara [32]. Su propósito fue diseñar un protocolo de encaminamiento para redes *ad hoc* formadas por nodos móviles tomando como punto de partida el protocolo DSDV, con el fin de solventar sus deficiencias: el alto número de envíos en modo *broadcast* y la latencia de transmisión [20, 32]. A su vez, el protocolo

DSDV también había sido concebido por Perkins en colaboración con Pravin Bhagwat cuatro años antes. El documento oficial vigente que describe las especificaciones del protocolo AODV, la RFC3561 (*Request For Comments*) número 3561, se publicó en julio de 2003 con la categoría de experimental [33].

Como ya se indicó en la Sección 2.2.2, el protocolo AODV es un protocolo reactivo, ya que el proceso de búsqueda de rutas se inicia sólo cuando un nodo necesita enviar información a otro nodo y desconoce cómo acceder a él. Además, está basado en la familia de algoritmos de vector de distancias y puede transmitir en modo *unicast* y *multicast*. Su modelo de comunicación es multicanal y tiene direccionamiento plano y estructura uniforme.

El protocolo AODV combina técnicas extraídas de los protocolos DSDV y DSR, dando lugar a un algoritmo que usa el ancho de banda de manera eficiente y que responde con rapidez a los cambios en la red al tiempo que garantiza la ausencia de bucles [17, 32, 33]. Con el fin de mantener sólo la información de encaminamiento más reciente, el protocolo AODV toma prestado de su predecesor, el protocolo DSDV, el concepto de número de secuencia. Tanto en el protocolo AODV como en el protocolo DSDV, cada nodo se encarga de mantener su propio contador o número de secuencia. Este número no es más que un valor entero que cada nodo incrementa monótonamente antes de generar un mensaje de control para copiarlo en éste antes de enviarlo. De manera complementaria al número de secuencia, cada nodo se distingue por un identificador único dentro de la red. De este modo, con la pareja de valores formada por el identificador del nodo y el número de secuencia, es posible distinguir la información válida de la anticuada. Si un nodo recibe dos paquetes con el mismo identificador de nodo pero con diferentes números de secuencia, la información más reciente será la incluida en el paquete de mayor número de secuencia. Puesto que cada nodo es responsable de su propio contador, no es necesario mantener un reloj único y común a toda la red, lo cual simplifica enormemente la implementación del protocolo [32]. El uso de estos números de secuencia garantiza la ausencia de bucles en todo momento y evita problemas como el de la “cuenta al infinito” [17, 33, 56]. En los protocolos que no incluyen ningún mecanismo de prevención, esta anomalía se produce cuando cae un enlace, afectando al menos a dos nodos. Considérese un primer nodo con dos enlaces: uno de ellos le conecta con un segundo nodo y el otro ha dejado de estar operativo. El segundo nodo, que desconoce que ha fallado el enlace, desea acceder a un destino al otro lado del enlace averiado, por lo que tendría que pasar por el primero de los nodos. Sin embargo, como el primer nodo no puede usar el enlace dañado, reenvía el paquete al segundo. Cada nodo cree equivocadamente que puede llegar a su destino a través del otro, por lo que ambos degeneran en un bucle infinito. Este problema de cuenta al infinito está típicamente asociado a los protocolos clásicos

de vector de distancias, ya que con este modelo de información de estado, los nodos sólo conocen el siguiente salto y no mantienen la topología completa de la red [57].

El protocolo AODV emplea un mecanismo de descubrimiento de rutas en modo *broadcast* que también emplea el protocolo DSR aunque con ciertas modificaciones. En el protocolo DSR, es el nodo origen quien se encarga de calcular la ruta completa hasta el nodo destino [31]. Esto puede degradar la prestaciones de la red cuando ésta es muy extensa, ya que cada paquete incluye en su cabecera la secuencia de nodos por los que debe pasar desde el origen hasta el destino. Por el contrario, en el protocolo AODV, el camino se forma gracias a la información mantenida en las tablas de rutas de los nodos intermedios, como se explica en la Sección 3.3.

3.2. Información de encaminamiento

El protocolo AODV almacena la información de encaminamiento en forma de tablas de rutas. Cada uno de los nodos de la red mantiene su propia tabla, que tiene tantas entradas como destinos conoce el nodo. Una entrada consta típicamente de los siguientes campos:

- **Dirección IP del destino.**
- **Número de secuencia del nodo destino.** Número de secuencia asociado al nodo destino, cuyo valor se obtiene de los mensajes de control.
- **Indicador de validez del número de secuencia del nodo destino.** Si se pretende alcanzar un nodo destino y ha fallado uno de los enlaces implicados, o la ruta ha expirado, el número de secuencia asociado a ese nodo destino se marca como inválido.
- **Otros indicadores sobre estado y rutas.** Por ejemplo, indicadores sobre si la ruta es o no válida, y en este último caso si es reparable, no es reparable y se debe buscar un camino alternativo, o bien, si está siendo reparada.
- **Interfaz de red.**
- **Número de saltos.** Número de saltos necesarios para alcanzar el destino desde este nodo.
- **Siguiente salto.** Nodo adyacente al que se debe enviar el paquete para llegar al destino deseado.

- **Lista de precursores.** Lista de nodos que forman el camino resultante del proceso de descubrimiento de rutas.
- **Tiempo de vida de la ruta.** Tiempo en el que la ruta caduca o debe ser borrada.

3.3. Descubrimiento de caminos

El proceso de descubrimiento de caminos se inicia cuando un nodo origen desea comunicarse con otro nodo pero desconoce cómo acceder a él, es decir, no tiene información de encaminamiento en su tabla de rutas acerca de ese nodo destino. Para ello, se intercambian principalmente dos tipos de mensajes: mensajes de solicitud o petición de ruta (RREQ, *Route REQuest*) y mensajes de respuesta de ruta (RREP, *Route REPLY*). En esta operación de búsqueda de rutas se pueden distinguir a su vez dos fases: la formación del camino de vuelta y la formación del camino de ida, explicadas en las siguientes páginas. En primer lugar, la formación del camino de vuelta establece todos los itinerarios posibles desde el origen hasta el destino, trazados por el recorrido de los mensajes RREQ. En segundo y último lugar, la formación del camino de ida determina la ruta que finalmente seguirán los paquetes desde el nodo origen hasta el nodo destino una vez finalizado el descubrimiento de caminos [32, 33].

3.3.1. Formación del camino de vuelta

Cuando un nodo origen desea alcanzar un nodo destino y desconoce cómo acceder a él, genera un mensaje RREQ. En él se incluyen las direcciones IP y los números de secuencia de los nodos origen y destino. Antes de enviar esta solicitud, el nodo origen incrementa su número de secuencia para evitar conflictos con peticiones anteriores. En el campo correspondiente al número de secuencia de destino, el nodo incluye el último valor aprendido, en caso de que ya hubiese solicitado esa ruta con anterioridad, o bien indica que es desconocido. El mensaje RREQ se difunde por inundación. La inundación es una técnica de envío de paquetes por la que cuando un nodo tiene información dirigida a un destino concreto, la transmite a sus vecinos. Si el nodo que la recibe no es el destinatario de esta información, la reenvía de nuevo. Este proceso continúa sucesivamente hasta alcanzar el nodo destino [58]. En complemento a la técnica de inundación y con el objeto de evitar un consumo excesivo del ancho de banda, el nodo origen emplea el algoritmo de búsqueda expansiva en anillo (*expanding ring search*). De acuerdo a este algoritmo, inicialmente el mensaje RREQ tiene asociado un valor pequeño de su tiempo de vida *TTL* (*Time-To-Live*), de tal manera que el mensaje se descarta cuando este tiempo expira. Si no se encuentra el destino antes de un plazo determinado, este valor se

incrementa progresivamente en el envío de las posteriores solicitudes de rutas. Con el fin de que un nodo no permanezca eternamente intentando alcanzar un destino inaccesible, se tiene un número máximo de intentos, cuyo valor es típicamente dos [33]. La Figura 3.1 representa una red compuesta por diez nodos, en la que se indica mediante flechas el recorrido de los mensajes RREQ. El nodo origen inicia el proceso de inundación con mensajes RREQ, que llegan a sus dos vecinos, quienes a su vez reenvían sucesivamente la solicitud. En este caso, se considera que ninguno de los nodos intermedios conoce el camino, por lo que la inundación se propaga hasta alcanzar el nodo destino.

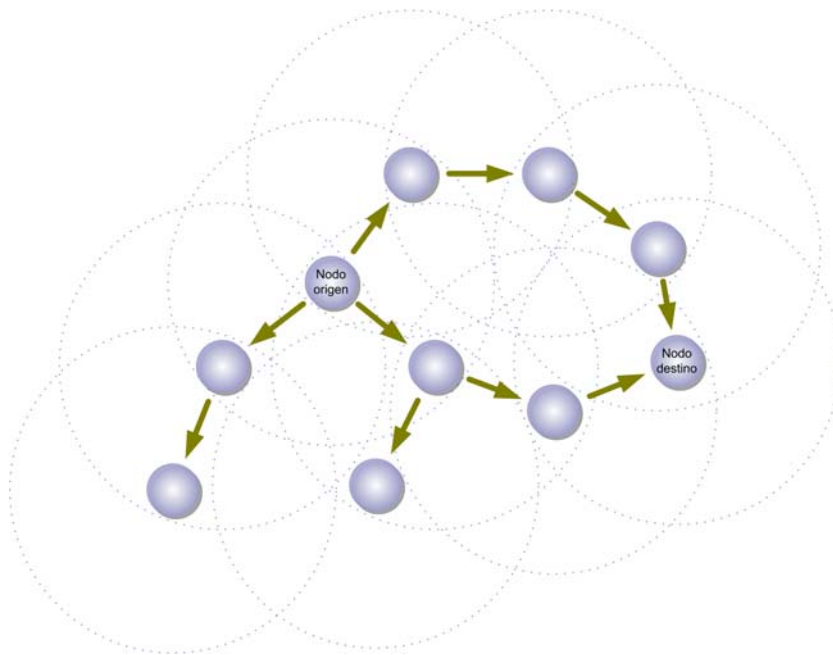


FIGURA 3.1: Inundación con mensajes RREQ

Cada vez que un nodo recibe el mensaje RREQ, comprueba si es él el destino buscado o si al menos conoce cómo acceder a él. Si no es así, el nodo recoge un registro de la solicitud y vuelve a reenviar el mensaje RREQ a sus vecinos, continuando con el proceso de inundación. Los nodos toman nota de los mensajes RREQ recibidos para no reenviar la misma solicitud varias veces, ya que esto sobrecargaría la red de manera innecesaria. La Figura 3.2 ilustra la fase de formación de los caminos de vuelta. Puesto que los nodos intermedios anotan de dónde proviene la solicitud, se forman cuatro caminos de vuelta, representados con líneas continuas. Como se puede apreciar, los caminos en colores rosados no son factibles, sólo las dos rutas trazadas en colores azulados comunican origen y destino. El proceso de inundación, y en consecuencia, la formación del camino de vuelta, se detiene cuando el nodo que recibe la solicitud es el nodo destino o conoce cómo llegar al mismo, dando lugar a la siguiente fase, la formación del camino de ida.

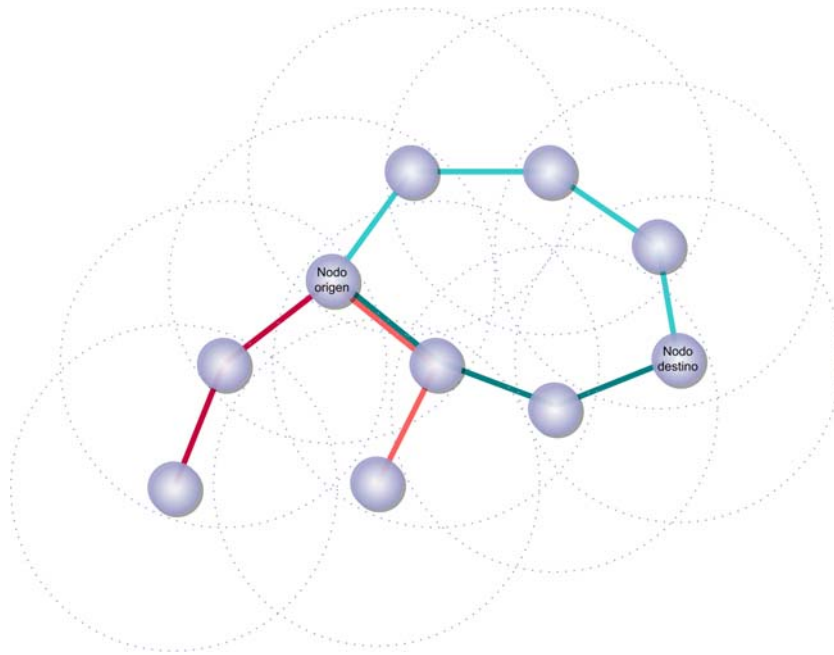


FIGURA 3.2: Generación de caminos de vuelta potenciales

3.3.2. Formación del camino de ida

Si el nodo que recibe la solicitud es el propio nodo destino o es un nodo intermedio que tiene una ruta activa¹ hacia el destino, se genera un mensaje de respuesta de ruta. Se considera que un nodo intermedio tiene una ruta activa hacia el destino cuando el número de secuencia del nodo destino almacenado en la tabla de rutas es mayor o igual al número de secuencia del nodo destino de la solicitud. Cuando es el nodo destino quien genera la respuesta, incluye en el mensaje RREP como número de secuencia el valor máximo entre su propio número de secuencia y los números de secuencia de destino incluidos en los mensajes de solicitud de rutas. A diferencia de la solicitud, el mensaje RREP se reenvía de vuelta al origen de forma *unicast*. Un mensaje RREP siempre sigue el camino inverso de su mensaje RREQ correspondiente, por lo que los nodos típicamente asumen que los enlaces son bidireccionales. La Figura 3.3 detalla la trayectoria de las respuestas para completar la fase de formación del camino de ida, en la que se indica mediante flechas el recorrido de los mensajes RREP. En este caso, puesto que se supone que ninguno de los nodos intermedios conoce la ruta, es el nodo destino quien genera la respuesta, por lo que los dos mensajes RREP que llegan al nodo origen tienen el mismo número de secuencia de destino. Para escoger una de las dos rutas posibles, se atiende al menor número de saltos, y así se selecciona el camino trazado en verde azulado, de tres saltos, en lugar del de color turquesa, que consta de cuatro.

¹válida

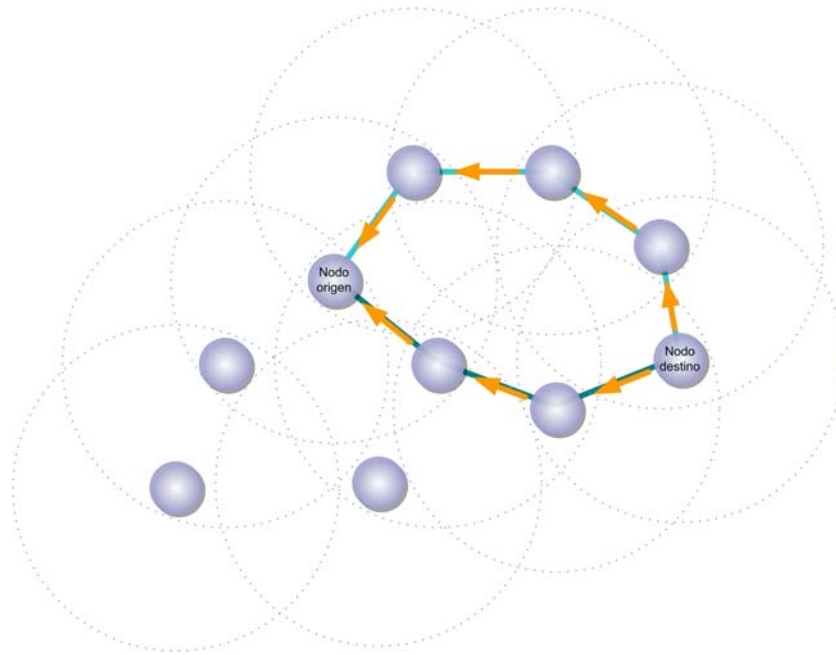


FIGURA 3.3: Reenvío de mensajes RREP

Cuando los nodos intermedios por los que pasó previamente la solicitud reciben la respuesta de rutas, pueden verse en la necesidad de actualizar su tabla de rutas. En la Figura 3.4 se muestra la lógica que siguen los nodos intermedios para decidir si actualizar o no la entrada en la tabla correspondiente al nodo destino. Un nodo intermedio procede a la actualización de rutas en dos casos. En primer lugar, refresca su ruta si el nuevo número de secuencia asociado al nodo destino que se incluye en el mensaje RREP es mayor que el que figura en su tabla para ese destino. En segundo lugar, cuando ambos números de secuencia coinciden, se procede a la actualización cuando el número de saltos indicado en la respuesta es inferior al indicado en su tabla [32]. Para computar el número real en función del número de saltos que aparece en la respuesta ha de sumarse una unidad para incluir al propio nodo.

Los mensajes RREP redundantes o con un número de secuencia de destino menor se descartan automáticamente. Cuando finalmente el nodo origen recibe el mensaje de respuesta, guarda la ruta hacia el destino y puede comenzar a transmitir paquetes de datos. La Figura 3.5 muestra el camino de ida definitivo. Sobre él se muestra el recorrido de los paquetes de datos mediante flechas.

3.4. Mantenimiento de caminos

El protocolo AODV, al igual que otros protocolos de encaminamiento, emplea mensajes *hello* o *beacons* para que los nodos anuncien a sus vecinos su pertenencia a la red

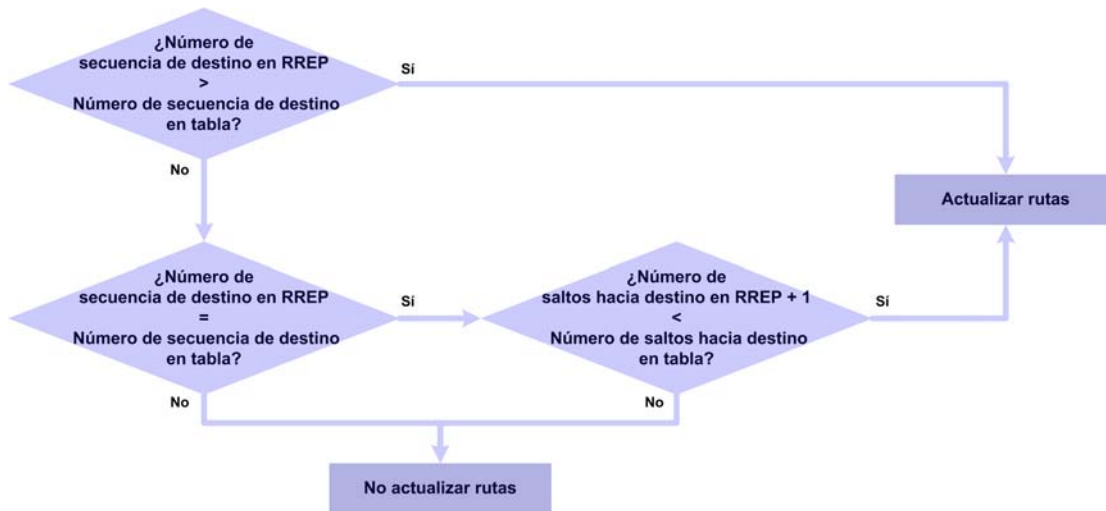


FIGURA 3.4: Diagrama de flujo para la actualización de rutas en los nodos intermedios durante la fase de formación del caminos de ida

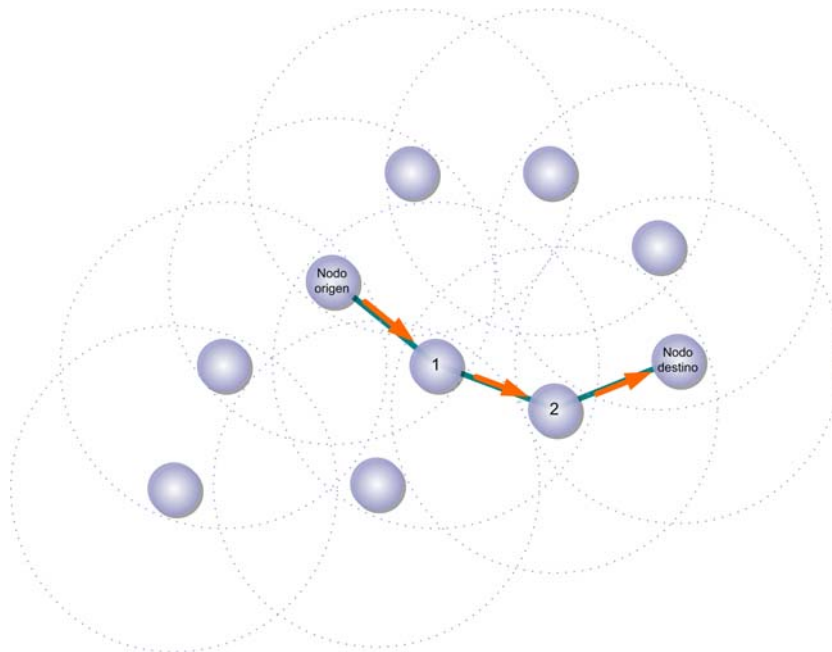


FIGURA 3.5: Envío de paquetes de datos sobre el camino de ida finalmente establecido

y, de esa manera, se pueda monitorizar en una ruta activa el estado del enlace hacia el siguiente salto. Los mensajes *hello* se envían de manera periódica, lo que permite detectar fallos de enlace. Cuando un nodo deja de recibir estos mensajes por parte de alguno de sus vecinos, puede concluir que el enlace ha dejado de estar operativo. En el momento en el que un nodo advierte un fallo en un enlace, difunde por *broadcast* un mensaje de error de ruta (RERR, *Route Error*) a sus vecinos, que a su vez lo propagan hacia nodos cuyas rutas podrían verse afectadas por esta eventualidad. Puesto que el mensaje RERR se propaga hacia el nodo origen, cada nodo intermedio marca como inválida la ruta cuando recibe el mensaje de error. No obstante, el nodo origen perjudicado puede

reiniciar su operación de descubrimiento de rutas en caso de que aún necesite alcanzar ese nodo destino [17, 59]

3.5. Alcance de los mensajes de control del protocolo AODV

Los mensajes RREQ y RREP, descritos en la Sección 3.3, junto con los mensajes *hello* y RRER, explicados en la Sección 3.4, son los mensajes de control más comúnmente intercambiados en el protocolo AODV [32, 33]. La Figura 3.6 toma como referencia el camino de ida formado sobre la red de ejemplo ilustrada en las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.5. En ella, se señala qué sentido de la comunicación toman los mensajes de *hello*, RREQ, RREP, datos y RRER, desde el nodo origen hacia el nodo destino.

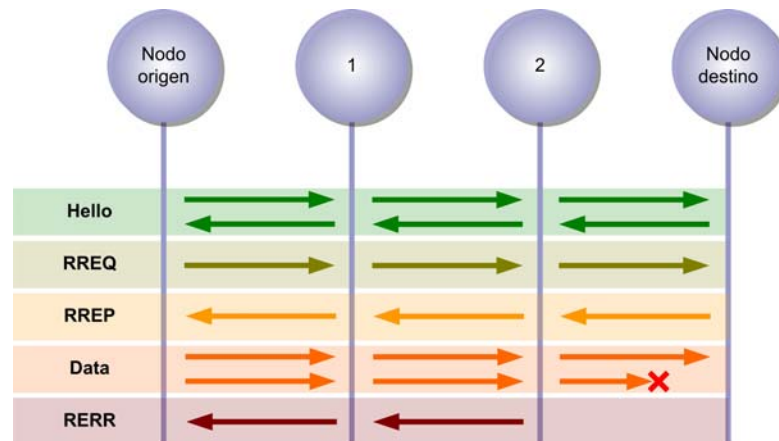


FIGURA 3.6: Mensajes de encaminamiento en AODV

Adicionalmente, los nodos también pueden intercambiar otros mensajes denominados mensajes de confirmación de respuesta de rutas, (RREP-ACK, *Route REPLY ACKnowledgment*). Se trata de mensajes mucho más infrecuentes ya que sólo se emplean cuando la red está formada por enlaces unidireccionales [33].

3.6. Parámetros

La implementación del protocolo AODV goza de ciertos grados de libertad para adaptarse a las peculiaridades de la red real a la que se aplica. Previo a la instalación del protocolo en los nodos de la red, es posible modificar el valor numérico de las constantes indicadas en el documento RFC3561. Se presentan a continuación algunos de los parámetros cuyo valor conviene alterar [33]:

NET_DIAMETER: Número máximo de saltos que para establecer un camino entre un nodo origen y un nodo destino. Por defecto su valor es 35.

ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT: Tiempo de validez de una ruta activa. Por defecto su valor es de 3 segundos.

MY_ROUTE_TIMEOUT: Cada nodo elige el tiempo de validez de las rutas en las que él es el nodo destino. Este valor se copia en el campo del tiempo de vida en el mensaje RREP que se genera previamente a la formación del camino de ida. Por defecto su valor es el doble de ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT.

ALLOWED_HELLO_LOSS: Número máximo de mensajes *hello* no recibidos antes de considerar que un enlace no está operativo. Por defecto su valor es 2.

RREQ_RETRIES: Número máximo de intentos de descubrimiento de rutas antes de considerar un destino inalcanzable. Por defecto su valor es 2.

TTL_START: Tiempo de vida inicial del mensaje RREQ empleado con el algoritmo de búsqueda expansiva en anillo, computado en número de saltos. Por defecto su valor es de 1.

TTL_INCREMENT: Incremento del valor de TTL_START empleado con el algoritmo de búsqueda expansiva en anillo. Por defecto su valor es de 2.

3.7. Particularidades

Como ya se indicó en el comienzo de este capítulo, el protocolo de encaminamiento AODV está diseñado para trabajar con redes móviles *ad hoc* extensas, con una población de decenas, cientos o incluso miles de nodos. Los nodos que implementan el protocolo AODV pueden soportar tasas de movilidad bajas, moderadas o relativamente altas, así como un amplio rango de niveles de tráfico de datos. En algunas configuraciones, las redes *ad hoc* son capaces de proporcionar conectividad entre dominios externos de encaminamiento que no emplean este protocolo. En este caso, se puede emplear una red que trabaje con el protocolo AODV como una simple red de tránsito. En cuanto a las perspectivas de futuro, AODV está preparado para convivir con IPv6. El único cambio necesario para la migración es incrementar la longitud de campos que contienen direcciones IP de 32 a 128 bits [33].

Actualmente, el protocolo AODV no proporciona ningún mecanismo de seguridad, pese a que los protocolos de encaminamiento son uno de los objetivos principales en los ataques de suplantación. Por el contrario, está diseñado para el uso en redes en las que

los nodos pueden confiar en el resto de los integrantes de la red, ya sea por el uso de claves preconfiguradas o porque se conoce que no hay nodos maliciosos. Para su uso en redes en las que la pertenencia de los nodos a la misma no está supervisada, se hace necesario añadir algún mecanismo de autenticación, entre los cuales se recomienda IPSec AH (*IP Security Authentication Header*) [33].

Capítulo 4

Entorno de trabajo

Para el desarrollo de este proyecto ha sido necesario configurar un entorno de trabajo muy específico y es el cometido del presente capítulo exponer sus características. Bajo el título de Entorno de trabajo se ofrecen dos secciones claramente diferenciadas. Para comenzar, la Sección 4.1, especifica los recursos empleados a nivel de red, *hardware* y *software*. En segundo y último lugar, en la Sección 4.2, se exponen los simuladores más habituales, ofreciendo una breve comparativa. Tras ofrecer los argumentos que sustentan la justificación de la elección, se detalla la herramienta seleccionada, el simulador de red ns-2.

4.1. Recursos empleados

El presente proyecto se ha desarrollado en las instalaciones del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos. Para la ejecución de este trabajo se ha contado con una estación personal y doce equipos adicionales, ya que sin éstos hubiese sido inabordable llevar a cabo las tareas de generación de datos debido a la alta carga computacional requerida. El diagrama de red de los equipos de trabajo se presenta en la Figura 4.1.

Los equipos empleados pertenecen a dos redes de área local diferentes. Tanto la estación personal de trabajo como el equipo pasarela o nodo raíz pertenecen a la red 193.147.53.0/24. La segunda de las redes, con dirección IP 192.168.1.0/24, es una red privada. Dentro de ésta existen 23 máquinas, de direcciones comprendidas entre la 192.168.1.11 y la 192.168.1.33, a las que se ha asignado el nombre de nodos de procesamiento por la función que desempeñan dentro del proyecto, la generación de datos. Concretamente, se ha hecho uso de las máquinas con direcciones en el rango

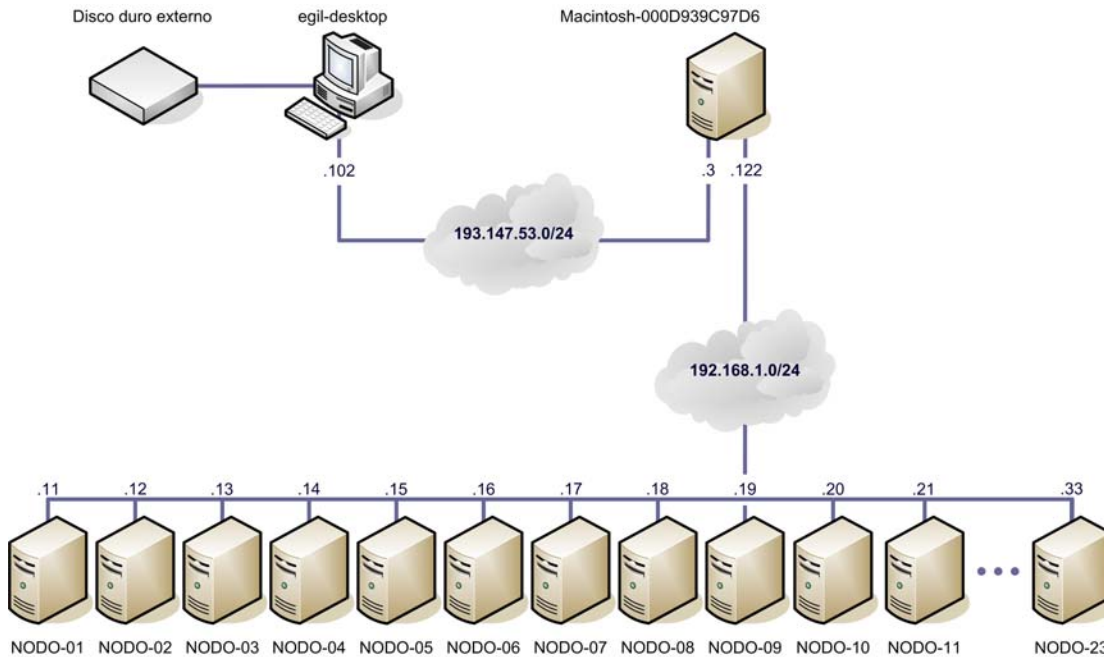


FIGURA 4.1: Esquema de red de los equipos empleados

192.168.1.11-192.168.1.21. En la Sección 5.3 se describe detalladamente cómo se han empleado estos equipos. Las siguientes subsecciones detallan el *hardware* y el *software* de estos equipos.

4.1.1. Estación de trabajo

La estación de trabajo personal, de alias `egil-desktop` es del fabricante Sun Microsystems. Cuenta con un procesador AMD Opteron Dual-Core en el que cada una de las unidades de procesamiento opera a 2,6GHz. El sistema dispone de una memoria RAM (*Random Access Memory*) del fabricante nVidia Corporation de 2GB y el disco duro con el que está equipado es de la marca SEAGATE con una capacidad de 250GB. En adición a esto y debido al gran tamaño y cantidad de datos generados, se hace necesario disponer de un dispositivo de almacenamiento masivo externo, en este caso, de un disco duro de sobremesa de 1,5TB de capacidad de la marca iomega0. El sistema operativo empleado es Ubuntu en su versión 2.6.24.

4.1.2. Nodo raíz

El nodo raíz, de alias `Macintosh-000D939C97D6`, también se conoce como nodo pasarela, ya que da acceso a los nodos de procesamiento, ya que éstos, al pertenecer a una red privada, no son accesibles desde el exterior. Análogamente a la estación de trabajo

local, el nodo raíz cuenta con un procesador de doble núcleo de la familia PowerPC G5 con una frecuencia de funcionamiento de 2,3 GHz. Además, dispone de 7GB de memoria SDRAM. El sistema operativo instalado es Mac OS X Server 10.5.6, siendo la versión del *kernel* la Darwin 9.6.0.

4.1.3. Nodos secundarios

Los 23 nodos de procesamiento están equipados con el mismo procesador que el nodo raíz. Cuentan con 4GB de memoria SDRAM (*Synchronous Dynamic RAM*), salvo el nodo número 23 que dispone de 3,5GB. Todos ellos tienen instalado el sistema operativo Mac OS X Server 10.4.11, siendo la versión del *kernel* la Darwin 9.6.0.

4.2. Herramientas de simulación de red

Las simulaciones asistidas por ordenador modelan objetos o actividades hipotéticas o de la vida real, permitiendo estudiar cómo funciona un sistema si se eligen adecuadamente los parámetros que lo caracterizan. Concretamente, los simuladores de red se emplean para diseñar, simular, verificar y analizar el rendimiento de protocolos y algoritmos de una manera controlada y reproducible. Por lo general, un simulador de red reúne una amplia gama de tecnologías y protocolos de red, ofreciendo la posibilidad de crear redes complejas compuestas de elementos básicos tales como equipos finales, concentradores, conmutadores, encaminadores o unidades móviles. Las áreas de aplicación de los simuladores de red son tan dispares como la investigación académica, los desarrollos industriales y los procesos de garantía de calidad. En el área de las redes de ordenadores, es muy costoso implementar un banco de pruebas completo con varios equipos, encaminadores y enlaces. Afortunadamente, los simuladores de red permiten analizar a bajo coste una gran variedad de escenarios. No obstante, los simuladores de red no son ideales, ya que no pueden modelar perfectamente todos los detalles reales. Sin embargo, si están bien diseñados, serán lo suficientemente precisos para ofrecer una idea del funcionamiento de la red real. Es por ello por lo que conviene estudiar qué características ofrecen los simuladores de red disponibles para conocer cuál es el más conveniente en cada circunstancia.

4.2.1. Comparativa de herramientas de simulación de red

Actualmente existen en el mercado numerosos simuladores de red que presentan variadas características. Una breve lista de los simuladores actuales más extendidos

incluye ns-2, ns-3, OMNeT++, OPNET, REAL, SSNNet, QualNet, J-Sim y TOTEM [60]. Los más ampliamente empleados son los cuatro primeros: ns-2, ns-3, OMNeT++ y OPNET, los cuales, además, representan la evolución reciente en el campo de los simuladores de red. En las siguientes páginas se ofrece una síntesis de las características más relevantes de estos cuatro simuladores bajo estudio.

4.2.1.1. Simulador de red ns-2

El simulador de red ns-2 (*Network Simulator version 2*) es uno de los simuladores de red de código abierto más populares. Su nombre proviene de su segunda versión, ampliamente extendida. La primera versión, desarrollada en 1989, se basa originalmente en REAL, un simulador de eventos discretos orientado a la creación de redes de investigación. El proyecto actual bajo el que se desarrolla el simulador cuenta con el apoyo de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa de los Estados Unidos, (DARPA, *Defense Advanced Research Projects Agency*). El simulador de red ns-2 fue desarrollado originalmente en la Universidad de California, Berkeley, y al igual que su predecesor, está basado en eventos¹. Emplea dos lenguajes de programación, C++ y OTcl (*Object Tool Command Language*), ambos orientados a objetos [61]. La Sección 4.2.2 profundiza en esta herramienta, ya que se trata del simulador de red elegido para la generación de datos.

4.2.1.2. Simulador de red ns-3

El simulador de red ns-3 guarda muchas semejanzas con ns-2, ya que también es un simulador de red basado en eventos de código fuente libre y está dirigido primordialmente a la investigación y al uso educativo. El simulador ns-3 está diseñado para sustituir al simulador ns-2. No obstante, ns-3 no es una mera versión actualizada de su predecesor, por el contrario, la nueva herramienta ha sido completamente rediseñada y no es compatible hacia atrás. En comparación con ns-2, ns-3 pone mucho más énfasis en la documentación y emplea Python en lugar de OTcl [62].

4.2.1.3. Simulador de red OMNeT++

El simulador de red OMNeT++ es también un simulador de código público y está respaldado por un potente interfaz gráfico de usuario (GUI, *Graphical User Interface*). Su principal área de aplicación es el ámbito de la industria y no el de la investigación. Es

¹el flujo de la simulación está dirigido por eventos, programados previamente por el usuario

especialmente adecuado en redes de comunicaciones, sistemas de información y telecomunicaciones, redes de colas, arquitecturas *hardware*, y procesos de negocio [63].

4.2.1.4. Simulador de red OPNET

El simulador de red OPNET es uno de los simuladores de red comerciales más extendidos. Se trata de un simulador muy robusto y que ocupa una gran cuota de mercado especializada en la investigación y desarrollo de redes en la industria. Puede ser utilizado con flexibilidad para estudiar redes de comunicación, dispositivos, protocolos y aplicaciones. Por el hecho de tratarse de *software* comercial, la compañía OPNET ofrece a los usuarios un interfaz gráfico potente y robusto. El editor, a través de este interfaz gráfico, puede ser utilizado para configurar topologías de red desde la capa física hasta la capa de aplicación.

4.2.2. Justificación de la elección del simulador de red ns-2

El simulador de red ns-2 es la herramienta elegida para la obtención de datos experimentales en el presente proyecto. Una de las principales razones es que goza de gran popularidad en el mundo académico, constituyendo un estándar *de-facto*² para la investigación en una amplia variedad de áreas en el campo de las redes [64]. Numerosos artículos [65–71], hacen uso extensivo de ella para la ejecución de experimentos en redes inalámbricas. Otro de los argumentos fundamentales que sustentan la elección, es que los trabajos previos realizados en el departamento, [8], también se apoyan en esta herramienta, por lo que, en el entorno en que se desarrolla este proyecto, se goza de conocimiento y experiencia en el mismo. La razón por la que se escoge el simulador ns-2 en detrimento de ns-3 reside en que cuando se inició el presente proyecto, la herramienta sucesora aún se encontraba en fase experimental, ya que la primera versión estable ns-3 data del 30 de Octubre de 2008 [72].

Como ya se introdujo en el punto 4.2.1.1, el simulador NS se basa en dos lenguajes. En primer lugar consta de un simulador orientado a objetos, escrito en C++ y de un intérprete de *scripts* de usuario implementado en OTcl³. El empleo de dos lenguajes diferentes se justifica por las bondades de los lenguajes compilados, como C++, y los lenguajes interpretados o de *scripting*, como OTcl. Los lenguajes compilados son robustos y eficientes para el diseño de aplicaciones, mientras que programar en lenguajes interpretados es una tarea más sencilla. La Figura 4.2 muestra la interrelación de estos

²no reconocido formalmente

³lenguaje de script Tcl con extensiones orientadas a objetos desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, *Massachusetts Institute of Technology*)

dos lenguajes de programación en el entorno del simulador ns-2 desde el punto de vista de un usuario. Con el fin de interactuar con el programa, el usuario define un *script* en OTcl en el que describe todas las características del modelo que se desea reproducir: la topología de red, los protocolos, los patrones de tráfico, así como la forma en la que el simulador debe producir la salida. Por otro lado, las librerías de ns-2, escritas y compiladas en C++, incluyen los objetos que modelan el planificador de eventos y los componentes básicos de red, permitiendo reducir el tiempo de procesamiento de paquetes y eventos. El simulador ns-2 analiza el *script* de usuario a través de su módulo intérprete OTcl y crea una correspondencia unívoca entre cada objeto OTcl y cada objeto de las librerías codificadas en C++. El simulador ns-2, debido a su arquitectura modular, permite la reutilización de código, de tal modo que cuando un usuario quiere crear un nuevo objeto de red, puede programar el nuevo objeto o bien emplear entidades ya definidas en la biblioteca. El *script* de entrada arranca un planificador de eventos, que lleva la cuenta del tiempo de simulación y dispara los diferentes eventos programados para cada instante de tiempo invocando los componentes de red pertinentes. Cada evento produce determinada información que el usuario recoge como salida del programa en forma de fichero de trazas (*trace file*). Si el usuario desea modificar los escenarios, no ha de hacer más que reprogramar el *script* OTcl [73].

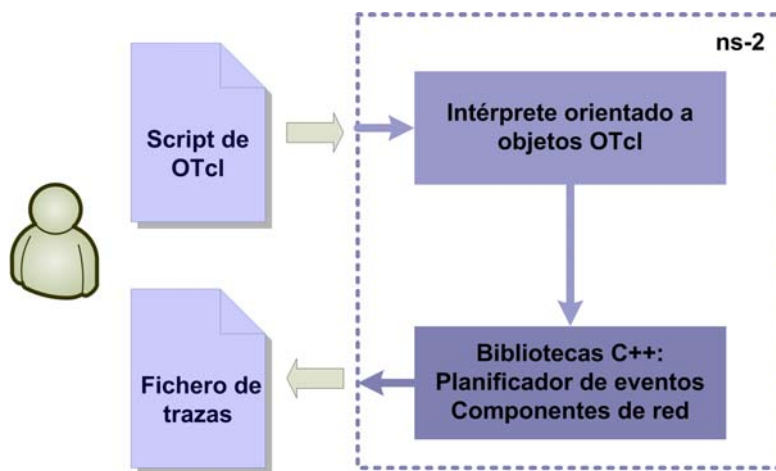


FIGURA 4.2: Perspectiva de ns-2 por parte de un usuario

El modelo de redes inalámbricas que implementa ns-2 se basa en un objeto denominado *MobileNode*, al que se añaden características adicionales de apoyo que permiten simular redes *ad hoc* multisalto, redes de área local inalámbricas (WLANs, *Wireless Local Area Network*) y redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Network*). Actualmente, los únicos cuatro protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* inalámbricas implementados son DSDV, DSR, AODV y TORA. El simulador ns-2 contempla el protocolo AODV como una combinación de los protocolos DSR y DSDV, tal y como se comentó en la Sección 3.1. La implementación de AODV integra los mecanismos de

descubrimiento y mantenimiento de rutas de DSR y emplea el encaminamiento salto a salto, los números de secuencia y los mensajes *hello* de DSDV [61].

Capítulo 5

Evaluación de la eficiencia de encaminamiento y descripción de los experimentos

El cometido de este proyecto es analizar la eficiencia en redes con un alto número de nodos, por lo que la configuración de los escenarios y la consecuente generación de datos mediante el proceso de simulación no ha sido tarea trivial. Por este motivo, se hace necesario un capítulo que describa pormenorizadamente este proceso y que sienta las bases en las que se sustentan los experimentos que se han llevado a cabo. En primer lugar, en la Sección 5.1, se define formalmente la medida empleada para evaluar la eficiencia de encaminamiento del protocolo AODV. A continuación, en la Sección 5.2, se justifica la elección de los parámetros que caracterizan a un escenario en el contexto de este trabajo. Para concluir, en la Sección 5.3, se ilustra el proceso completo de la generación masiva de datos.

5.1. Formalización teórica de la eficiencia de encaminamiento

La finalidad de este trabajo es evaluar las prestaciones del protocolo AODV en términos de eficiencia de encaminamiento, como se comentó en la Sección 2.2.3. Cabe pensar en primera instancia que un protocolo de encaminamiento será más eficiente cuanto mayor sea su capacidad para dirigir paquetes desde un nodo origen hacia un nodo destino a través del camino más cercano a la recta que los une. La Figura 5.1 muestra una red compuesta por 25 nodos dispuestos aleatoriamente sobre un espacio

bidimensional. En ella se considera que un nodo únicamente es capaz de comunicarse con sus nodos adyacentes.

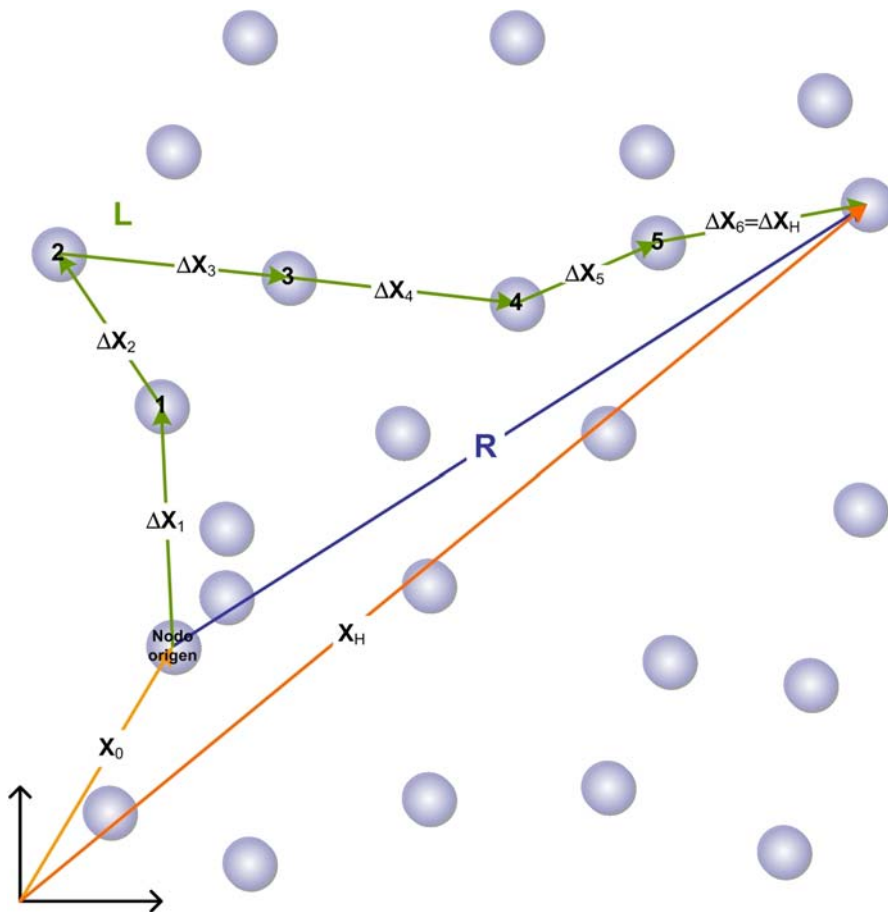


FIGURA 5.1: Representación gráfica de los vectores \mathbf{R} , \mathbf{x}_h y la magnitud escalar L sobre una red no regular compuesta por 25 nodos

Como se puede apreciar, el nodo origen, alcanza el nodo destino a través de cinco nodos intermedios, de tal manera que el número de saltos H necesarios para llegar al destino es $H = 6$. La ubicación de un nodo cualquiera i se puede expresar con respecto al origen de coordenadas mediante vectores de posición \mathbf{x}_h , siendo $\mathbf{x}_h = a_x \hat{\mathbf{u}}_x + a_y \hat{\mathbf{u}}_y$. El vector de posición \mathbf{x}_0 indica la situación del nodo origen, mientras que el vector de posición \mathbf{x}_H marca la ubicación del nodo destino. Igualmente, se puede expresar mediante magnitudes vectoriales la diferencia de posición entre dos nodos de la red, siendo $\Delta \mathbf{x}_h = \mathbf{x}_h - \mathbf{x}_{h-1}$. El vector \mathbf{R} se define formalmente como el vector con punto de aplicación en la ubicación de origen y extremo en la posición de destino:

$$\mathbf{R} = \mathbf{x}_H - \mathbf{x}_0 \quad (5.1)$$

Su correspondiente módulo, R , es por tanto la distancia euclídea desde origen hasta destino.

$$R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{x}_H - \mathbf{x}_0| \quad (5.2)$$

Por su parte, la magnitud escalar L es la suma de las distancias de los saltos recorridos desde el nodo origen hasta el nodo destino.

$$L = \sum_{h=1}^H |\Delta \mathbf{x}_h| \quad (5.3)$$

Este caso general correspondiente a una distribución aleatoria de los nodos sobre el plano se simplifica en el caso de que los nodos adyacentes estén separados una distancia d . Este tipo de redes en las que los nodos vecinos equidistan se conocen como redes regulares. La Figura 5.2 ilustra la magnitud vectorial \mathbf{R} y la magnitud escalar L sobre una red regular compuesta por 25 nodos.

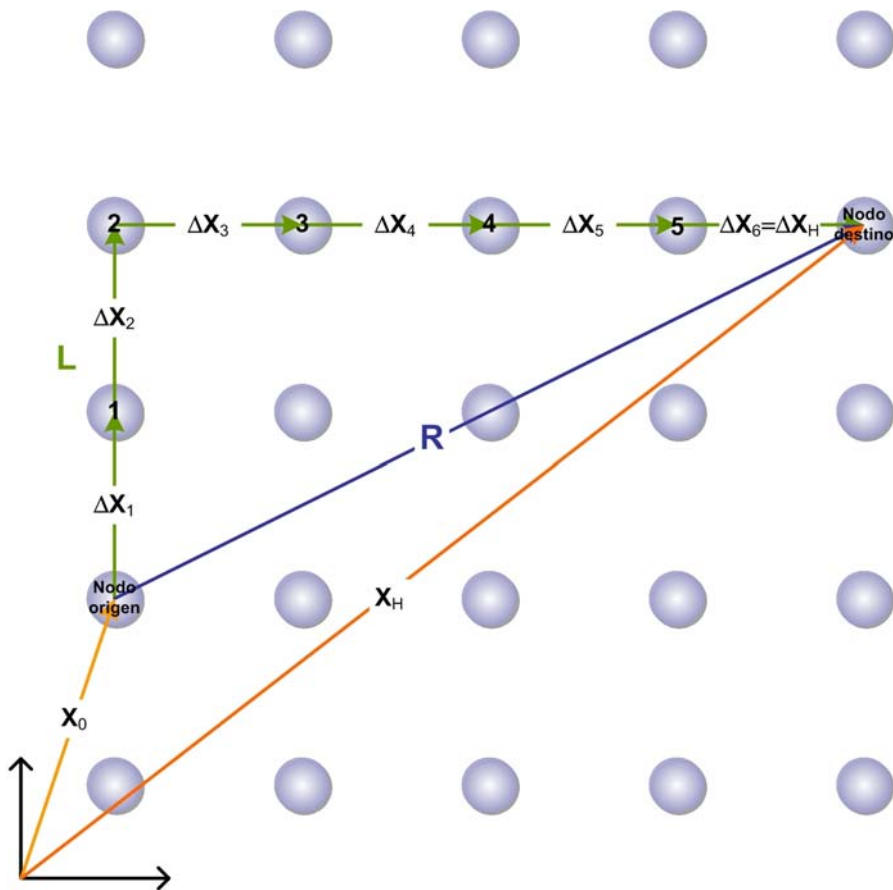


FIGURA 5.2: Representación gráfica de los vectores \mathbf{R} , \mathbf{x}_h y la magnitud escalar L sobre una red regular compuesta por 25 nodos

Puesto que en este caso $\Delta \mathbf{x}_h = \Delta \mathbf{x}_i, \forall h \neq i$, y por tanto $|\Delta \mathbf{x}_h| = d, \forall h$, la expresión de la magnitud escalar L se reduce a:

$$L = \sum_{h=1}^H |\Delta \mathbf{x}_h| = d \cdot H \quad (5.4)$$

Se considera que una ruta será tanto más eficiente cuanto más corto sea el recorrido entre el nodo origen y el nodo destino, esto es, cuanto más próximo sea el valor de L al valor de R . Por tanto, para una única ruta, la eficiencia de encaminamiento queda parametrizada a través del cociente R/L . Puesto que $R \leq L$, $R/L \in (0, 1]$. Se dice que una es ruta óptima cuando es totalmente directiva, es decir, cuando la distancia que recorren los paquetes entre los dos nodos es la mínima, dando lugar a un cociente unitario: $R/L = 1$.

Considérese ahora que en lugar de una sola ruta se dispone de múltiples rutas, estando cada una de ellas caracterizada por sus valores correspondientes de R y L . Si estas rutas se generan de manera aleatoria, entonces la distancia y el camino real entre cada pareja de nodos es también aleatoria. En consecuencia, los valores R y L pasan a ser variables aleatorias (vv.aa.). Dado que el cociente de dos vv.aa. es también una v.a, se define una nueva v.a. Z como $Z = R/L$. Si se desea estudiar ahora la eficiencia de encaminamiento sobre el conjunto de múltiples rutas, se hace necesario establecer una métrica para valorar la eficiencia de la distribución estadística de la v.a. Z .

En estos términos, se define en [8] un parámetro denominado radio de persistencia, denotado por ξ . Este parámetro permite evaluar la eficiencia de encaminamiento de un protocolo a partir de Z , esto es, la distribución estadística del cociente R/L . Los fundamentos teóricos para la obtención del parámetro ξ se desarrollan en [8], siendo su expresión matemática:

$$\xi \equiv \frac{2\kappa\beta}{D-1} \quad (5.5)$$

Este parámetro ξ aglutina todos los factores a tener en cuenta para una completa evaluación de la eficiencia de un protocolo de encaminamiento. El parámetro κ está relacionado con la directividad del protocolo, el factor β hace alusión a la movilidad de los nodos y D expresa la dimensión de la red.

5.2. Caracterización de los escenarios

El diseño de los experimentos realizados en forma de simulaciones es una tarea vital para que los resultados obtenidos sean representativos y puedan ser analizados con base

a métricas generalizables. De especial importancia es la selección de los parámetros que intervienen en la realización de las simulaciones, ya que los resultados deben ser fruto de la influencia de un conjunto finito de factores. En el presente proyecto, los parámetros considerados son los siguientes:

1. **Topología.** Los nodos se emplazan sobre el espacio bidimensional de manera regular formando triángulos equiláteros o cuadrados.
2. **Dimensionamiento.** Se escoge un número elevado de nodos con el fin de cumplir la condición de gran escala.
3. **Cobertura.** La potencia de transmisión junto con la distancia entre nodos determina el rango de alcance de los mismos.
4. **Desplazamiento.** Se considera desplazar levemente la situación de los nodos con el fin de conseguir un conjunto más amplio de valores de la v.a. Z .

Las siguientes subsecciones tienen como propósito detallar la justificación de la elección de cada uno de estos parámetros así como su trascendencia en los resultados obtenidos.

5.2.1. Topología

Como punto de partida se toman modelos bidimensionales de red regular, ya que con ello se facilita considerablemente la interpretación de los resultados y permite una conexión homogénea entre los nodos de la red. Con el fin de distribuir los nodos de la red de tal forma que los nodos contiguos estén separados la misma distancia, se acude al concepto de teselación. Una teselación se define como el embaldosado con polígonos regulares, en el caso de dos dimensiones; poliedros, en el caso de tres dimensiones o politopos, en el caso de N -dimensiones. Las teselaciones se pueden especificar mediante la notación de Schläfli [74]. Siguiendo esta nomenclatura, los símbolos $\{p, q\}$ denotan una teselación formada por polígonos regulares con p aristas y q politopos que rodean a cada uno de estos polígonos. En dos dimensiones, una teselación es un patrón de figuras que cubre completamente una superficie de manera que no queden huecos y sin que las figuras se traslapen [75]. La Figura 5.3 muestra las únicas tres teselaciones regulares existentes, compuestas por polígonos regulares que recubren simétricamente el plano. Se corresponden a teselaciones formadas por triángulos equiláteros, cuadrados y hexágonos, caracterizadas en la notación de Schläfli por $\{3, 6\}$, $\{4, 4\}$ y $\{6, 3\}$, respectivamente.

Ubicando los nodos de la red sobre los vértices de los polígonos que componen cada teselación, se obtiene una red regular en la que los nodos contiguos equidistan una

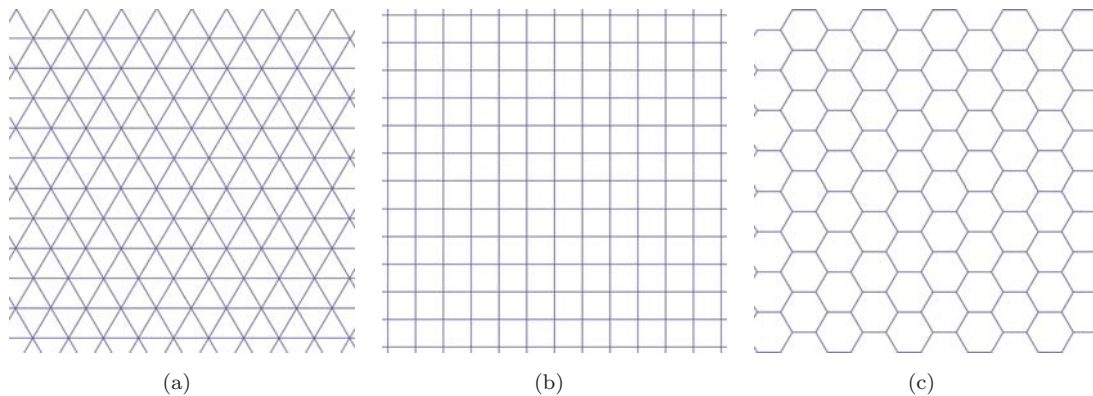


FIGURA 5.3: (a) Teselación regular formada por triángulos equiláteros $\{3,6\}$; (b) teselación regular formada por cuadrados $\{4,4\}$; (c) teselación regular formada por hexágonos $\{6,3\}$

distancia d . El número de aristas que confluyen en un vértice da idea de la conectividad del nodo emplazado sobre el mismo, ya que el número de aristas que confluyen en un vértice coincide con el grado de conectividad de los nodos, denotado por A . Nótese que aquí A coincide con el parámetro q de la notación de Schläfli. Sólo en el caso de una red con un número de nodos $N = \infty$, el grado de todos los nodos es idéntico. Antes de proseguir, es conveniente destacar la dualidad entre las teselaciones $\{3,6\}$ y $\{6,3\}$. La teselación compuesta por triángulos equiláteros da lugar a una disposición en la que los nodos tienen grado $A = 6$; en la formada por hexágonos, los nodos se disponen con un grado $A = 3$.

Con el fin de simplificar los cálculos, se introduce el concepto de capa. Una capa es la agrupación de nodos de manera concéntrica a diferentes profundidades respecto al nodo central, estando la primera capa formada por los A nodos adyacentes a ese nodo central. La Figuras 5.4, 5.5, 5.6 muestran gráficamente el concepto de agrupación por capas concéntricas para las teselaciones $\{3,6\}$, $\{4,4\}$ y $\{6,3\}$, respectivamente. Como se puede apreciar, el número de nodos que integran la primera capa es el grado del nodo central, que por extensión, debido a que se trata de una red regular, es también el grado de todos los nodos excepto los emplazados en los extremos.

El número de nodos N de una topología se puede extraer en función del número de capas C . A partir de este número de capas C , se tienen diferentes formulaciones para las teselaciones formadas por triángulos equiláteros (5.6), cuadrados (5.7) y hexágonos (5.8):

$$N = 1 + 3C(C + 1) \quad (5.6)$$

$$N = (2C + 1)^2 \quad (5.7)$$

$$N = 3 \times (C + \lfloor \frac{C}{2} \rfloor) \quad (5.8)$$

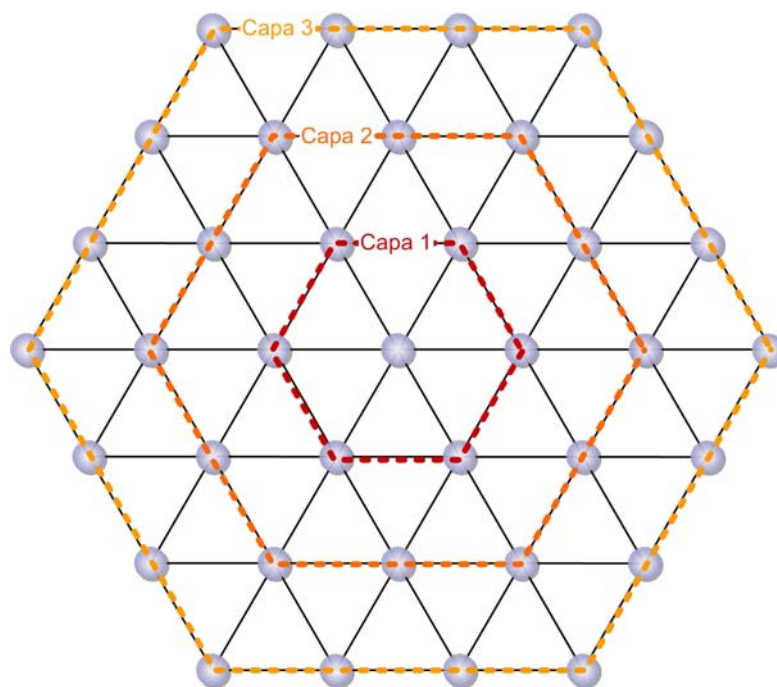


FIGURA 5.4: Teselación regular formada por triángulos equiláteros $\{3,6\}$ sobre cuyos vértices se ubican los nodos

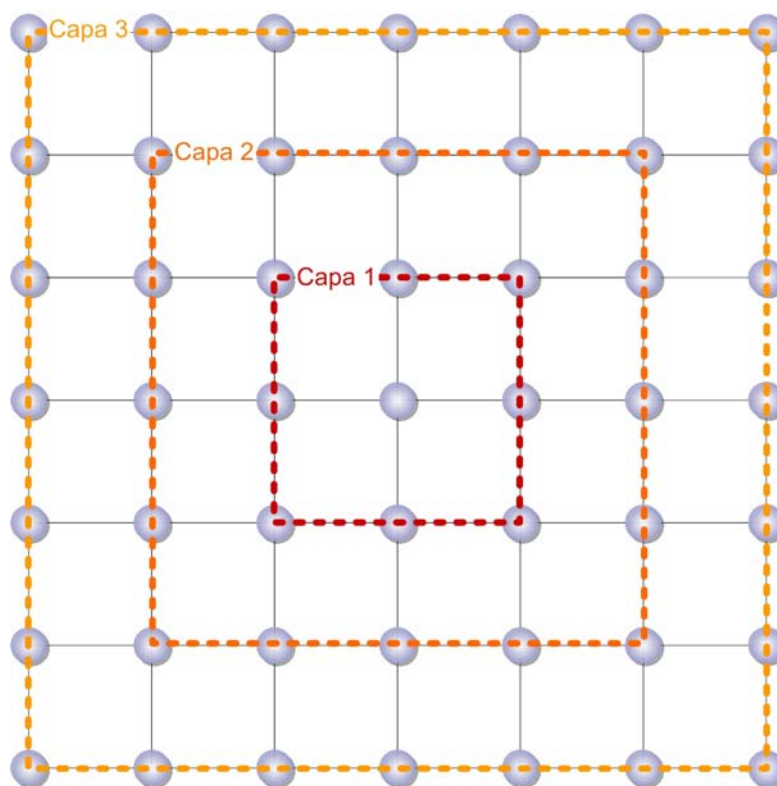


FIGURA 5.5: Teselación regular formada por cuadrados $\{4,4\}$ sobre cuyos vértices se ubican los nodos

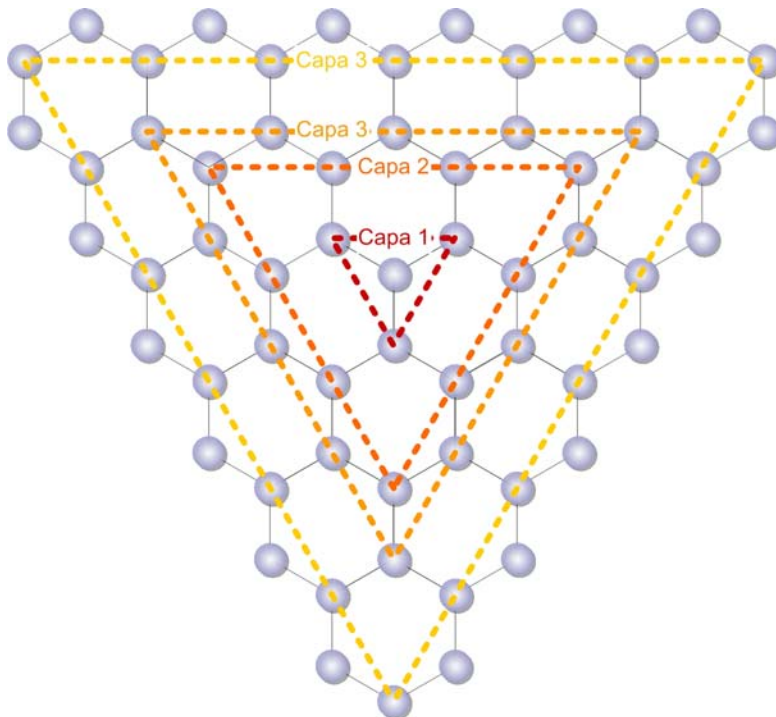


FIGURA 5.6: Teselación regular formada por hexágonos $\{6,3\}$ sobre cuyos vértices se ubican los nodos

Otro parámetro vinculado con el número de capas C es el diámetro de la red, D , que indica el número de saltos desde un nodo origen emplazado en un extremo de la red hasta un nodo destino ubicado en el extremo diagonalmente opuesto. Para cualquier teselación, el diámetro se puede calcular de forma directa a partir del número de capas: $D = 2C + 1$.

Las teselaciones escogidas para disponer los nodos sobre un espacio bidimensional sobre una configuración regular son los patrones $\{3, 6\}$ y $\{4, 4\}$. La elección de estas dos topologías se basa en el concepto de grado y subsecuentemente en la idea de conectividad. La conectividad se concreta mediante el número de primeros vecinos que tiene un nodo, por lo que coincide con el número de trayectorias, considerando dirección y sentido, que puede seguir un paquete hasta el siguiente nodo. Por tanto, en una teselación $\{3, 6\}$ se tiene una conectividad de 6 y en una teselación $\{4, 4\}$ se tiene una conectividad de 4. Por otro lado, sea H el número de saltos que un nodo origen necesita para alcanzar un destino cualquiera y A_H , el número de caminos posibles para ese número de saltos H . Si se considera una configuración en la que un nodo alcanza un destino en un salto, es decir, $H = 1$, se tienen tantos caminos como nodos destino posibles. Así, cualquier nodo emplazado en una teselación $\{3, 6\}$, tiene $A_1 = 6$ posibles nodos destinos, si está ubicado en una teselación $\{4, 4\}$, tiene $A_1 = 4$ destinos potenciales y en el caso de estar ubicado

sobre una teselación $\{6, 3\}$ sólo puede alcanzar $A_1 = 3$ destinos diferentes para un solo salto. Si ahora se parte del supuesto de que un nodo alcanza un destino en dos saltos, $H = 2$, entonces para las teselaciones $\{3, 6\}$, $\{4, 4\}$ y $\{6, 3\}$, se tendrán $A_2 = 36$, $A_2 = 12$ y $A_2 = 6$ caminos posibles respectivamente. Cabe señalar que cuando el número de saltos $H > 1$, el número de destinos posibles es siempre inferior al número de destinos alcanzables, ya que existe al menos un camino posible para acceder a cada destino. El crecimiento del número de caminos posibles trazados con un número de saltos H es exponencial con respecto a A , estando el valor A_H dado por las siguientes expresiones:

- **Teselación $\{3, 6\}$:** $A_H = A \cdot 6^{H-1} = 6 \cdot 6^{H-1} = 6^H$. Para $H = 1, 2, 3, 4 \dots$ se tiene $A_H = 6, 36, 216, 1296 \dots$
- **Teselación $\{4, 4\}$:** $A_H = A \cdot 3^{H-1} = 4 \cdot 3^{H-1}$. Para $H = 1, 2, 3, 4 \dots$ se tiene $A_H = 4, 12, 36, 108 \dots$
- **Teselación $\{6, 3\}$:** $A_H = A \cdot 2^{H-1} = 3 \cdot 2^{H-1}$. Para $H = 1, 2, 3, 4 \dots$ se tiene $A_H = 3, 6, 12, 24 \dots$

La justificación de la elección de las teselaciones $\{3, 6\}$ y $\{4, 4\}$ como patrones de red se debe a que éstas ofrecen un número de caminos posibles A_H para un número dado de saltos H mucho mayor que en el caso de la teselación $\{6, 3\}$. Cuanto mayor es el grado A de un nodo, más nodos son candidatos a ser elegidos como siguiente salto y por tanto, menos probabilidad tiene un nodo determinado para ser elegido como siguiente salto. Este hecho es muy deseable en los experimentos realizados, puesto que de esta manera se pueden estudiar las preferencias de los nodos a tomar un nodo como siguiente salto y no otro. Este concepto, denominado directividad, es entendido como el mantenimiento en cada salto de la dirección trazada previamente [8].

De ahora en adelante y para simplificar la terminología, las teselaciones $\{3, 6\}$ y $\{4, 4\}$ se nombrarán como topología triangular y topología cuadrada, empleando los subíndices tr y sq respectivamente.

5.2.2. Dimensionamiento

Como se ha mencionado con anterioridad, las redes bajo estudio son redes de gran escala. Una red de gran escala es, en esencia, una red con un número suficientemente elevado de nodos tal que la distancia entre dos nodos adyacentes es despreciable respecto a la distancia real que une el nodo origen y el nodo destino. Esto equivale a considerar que el número de saltos H desde el nodo origen hasta el nodo destino tiende a infinito: $H \rightarrow \infty$. A efectos prácticos, se considera que una red es de gran escala cuando el

número de nodos es superior a 500 [8]. La tabla 5.1 muestra las relaciones entre el número de capas, diámetro y el número de nodos considerados para la ejecución de los experimentos. El número de nodos para una teselación triangular N_{tr} y una teselación cuadrada N_{sq} se obtiene a partir del número de capas C mediante las ecuaciones (5.5) y (5.6) respectivamente.

C	N_{tr}	N_{sq}
11	397	529
12	469	625
13	547	729
14	631	841
15	721	961
16	817	1089
17	919	1225
18	1027	1369
19	1141	1521
20	1261	1681
21	1387	1849
22	1519	2025
23	1657	2209
24	1801	2401

TABLA 5.1: Número de nodos en una topología triangular (N_{tr}) y cuadrada (N_{sq}) en función del número de capas

En adición a lo anterior, disponer de un alto número de nodos tiene el efecto favorable de disminuir los efectos de borde. El hecho de contar con redes de gran escala permite adaptar la formulación teórica desarrollada en el departamento, formulación que se basa en un modelo continuo de la red.

5.2.3. Cobertura

Otro de los parámetros a tener en consideración es la potencia de transmisión. El valor de la potencia de transmisión determina, junto con la distancia de separación entre los nodos, el alcance a los nodos ubicados en las proximidades. Con el fin de no incluir más parámetros variables que oscurezcan la generalidad de los resultados, la potencia de transmisión de los nodos se fija a un valor de 100mW. Este valor permite que, para una distancia entre nodos contiguos de 300m, el rango de cobertura sólo alcance a los primeros vecinos. Es de especial importancia el hecho de que el alcance sólo incluya a primeros y no a segundos vecinos, ya que la obtención de L como producto de la distancia y número de saltos no sería posible al tener saltos de longitudes diferentes. Sea $d = d_{1v}$ la distancia desde un nodo a sus primeros vecinos y d_{2v} la distancia desde un nodo a sus segundos vecinos. Como puede comprobarse en la Figura 5.7, un nodo en la topología cuadrada tiene cuatro primeros vecinos y cuatro segundos vecinos, siendo

$d_{2v} = \sqrt{2}d$. Por su parte, un nodo en la topología triangular tiene seis primeros vecinos y seis segundos vecinos, con $d_{2v} = \sqrt{3}d$.

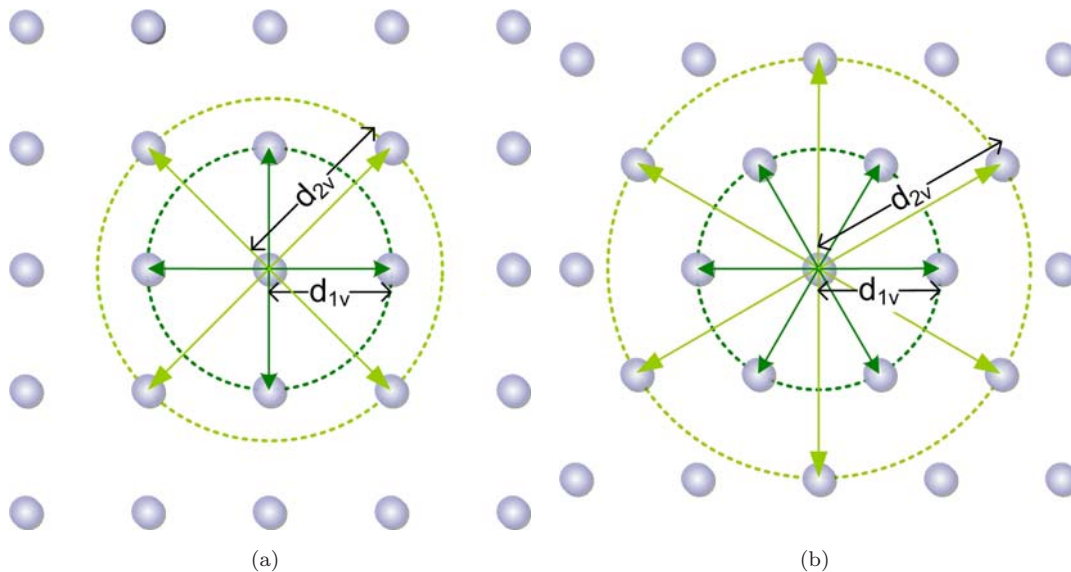


FIGURA 5.7: Distancia desde un nodo a sus primeros vecinos d_{1v} frente a la distancia a sus segundos vecinos d_{2v} (a) en una topología cuadrada regular; (b) en una topología triangular regular

5.2.4. Desplazamiento

Hasta ahora se ha mostrado únicamente la preferencia por el emplazamiento de los nodos sobre unas coordenadas fijas para dar lugar a una red completamente regular. Una distribución perfectamente regular de los nodos sobre la red ocasiona que el cociente R/L sólo tome valores dentro de un conjunto discreto, lo que dificulta la extrapolación del modelo teórico continuo. Puesto que el número de nodos es finito, los valores de la distancia euclídea entre cualquier par de nodos, R , siempre pertenecen a un conjunto finito de valores. Análogamente sucede con la magnitud escalar L , que sólo puede tomar un número finito de valores. Supuesto el caso de que la potencia de transmisión sólo permite alcanzar a primeros vecinos, el valor L , sólo puede tomar valores que sean múltiplos de la distancia que separa a primeros vecinos, d_{1v} . Además, los propios mecanismos del protocolo AODV aseguran que el valor de L nunca será infinito. En la Sección 3.6 ya se indicó que el protocolo AODV garantiza la ausencia de bucles e impone la restricción del número máximo de saltos entre un nodo origen y un nodo destino. No obstante, no ha de olvidarse que en una red con un número finito de nodos, el valor del cociente R/L siempre pertenecerá a un conjunto finito valores, pero se hace necesario idear algún procedimiento para aumentar el número de valores posibles y favorecer así la aplicación de un modelo teórico continuo.

Por esta razón se modifica ligeramente la posición original de los nodos introduciendo un factor de desplazamiento o dispersión denotado por σ , dando lugar a una estructura cuasi-regular de la red. En cada una de las realizaciones, los nodos se ubican aleatoriamente de acuerdo a una distribución gaussiana de media 0 y desviación típica σ con respecto a su posición correspondiente según la teselación. Esta modificación de los emplazamientos de los nodos aumentan el número de posibles valores del cociente R/L . Según el estudio realizado en [8], los resultados obtenidos sobre posiciones originales y modificadas arrojan resultados similares.

5.3. Descripción de las simulaciones

La metodología seguida consta de diferentes pasos diferenciados. En primer lugar, han de elegirse los escenarios a simular. A continuación, han de implementarse estos escenarios atendiendo a los parámetros expuestos en la Sección 5.2. Posteriormente, y previo a su instalación, es necesario modificar la configuración de la implementación del protocolo AODV sobre el simulador de red ns-2 para particularizarlo a las condiciones de trabajo requeridas. Por otro lado, en la Sección 4.2.2 se indicó que esta herramienta de simulación precisa de un *script* escrito en lenguaje OTcl en el que se indiquen los parámetros que modelan la topología y el patrón de tráfico, por lo que ha de elaborarse este fichero. Sólo tras esto es posible preparar y ejecutar el banco de simulaciones mediante automatización. Por último, y para desechar la información no relevante, se efectúa una tarea de filtrado. Las siguientes páginas se dedican a explicar pormenorizadamente estas tareas.

5.3.1. Elección de escenarios

Atendiendo a los factores que, bajo la perspectiva de este proyecto, caracterizan un escenario, recogidos en la Sección 5.2, se eligen diferentes entornos de simulación. Concretamente, se toman dos escenarios para la topología triangular y dos para la topología cuadrada. Para el caso de la topología triangular, los dos entornos comparten una distancia entre primeros vecinos $d_{1v} = 300m$ y un factor de desplazamiento $\sigma = 20$. Los escenarios triangulares se diferencian únicamente el número de nodos, caracterizándose el primero de ellos por $N = 1387$ y el segundo, por $N = 919$. En el caso de la topología cuadrada se tienen dos escenarios que comparten el número de nodos $N = 1089$ y sin factor de desplazamiento, por lo que los nodos son perfectamente equidistantes. En el primero de ellos, con una distancia entre primeros vecinos de $d_{1v} = 320m$, se consigue cobertura a primeros vecinos. Si este valor se altera, fijando $d_{1v} = 300m$, se obtiene un alcance a segundos vecinos. El estudio de estos dos escenarios basados en topología

cuadrada permite examinar cómo afecta la modificación del parámetro A a la eficiencia de encaminamiento. La Tabla 5.2 ofrece un resumen de los escenarios implementados, reflejando los valores escogidos para cada uno de los factores que caracterizan una simulación: topología, número de capas C , diámetro D , número de nodos N , potencia de transmisión P_{tx} , distancia entre primeros vecinos d_{1v} , factor de desplazamiento σ y el alcance resultante:

Topología	C	D	N	P_{tx}	d_{1v}	σ	Alcance
Triangular	21	43	1387	100mW	300m	20	Primeros vecinos
Triangular	17	35	919	100mW	300m	20	Primeros vecinos
Cuadrada	16	33	1089	100mW	320m	0	Primeros vecinos
Cuadrada	16	33	1089	100mW	300m	0	Segundos vecinos

TABLA 5.2: Resumen de los escenarios simulados

5.3.2. Generación de escenarios

Ya se ha indicado en anteriores ocasiones que el simulador de red ns-2 utiliza un *script* definido por el usuario en lenguaje OTcl que describe los escenarios a modelar. Entre otras sentencias que rigen la secuencia de eventos que se disparan durante una simulación, en el *script* OTcl se suelen indicar tanto la disposición de los nodos en el espacio, como las fuentes y sumideros de tráfico. Generalmente, estos dos tipos de variables se pueden incluir directamente en el *script* de usuario, pero debido al gran volumen de nodos que integran los escenarios, se hace imprescindible contar con ficheros de texto externos. Estos ficheros externos que indican las coordenadas cartesianas de los nodos de la red y qué nodos forman las parejas son generados con la herramienta Matlab, debido al amplio conocimiento que se tiene sobre la misma en el entorno en que se coordina este proyecto. Dicha herramienta también será usada posteriormente para el filtrado de datos y el análisis de resultados.

Para la realización de esta tarea, se partió del procedimiento realizado en [8], aunque se realizaron posteriormente numerosas modificaciones para adaptarlo a estos nuevos experimentos. En cuanto al cálculo de las posiciones de los nodos, los datos de partida son la distancia entre nodos adyacentes d y el número de capas C , a partir del cual se puede extraer el número de elementos N que componen la red. En relación al cálculo de las parejas sólo es necesario el número de capas C para obtener el número de nodos N .

Se procede realizando N iteraciones, y en cada una de ellas se escogen $N - 1$ parejas aleatoriamente, dando lugar a $N \times (N - 1)$ realizaciones. De esta forma se garantiza que no se prioriza ningún camino sobre otro, al tiempo que se reduce la duración de las simulaciones. En la Figura 5.8 se expone el esquema de programas Matlab y ficheros

de texto externos empleados para modelar los escenarios de la topología triangular y cuadrada en cuanto a las posiciones de los nodos y a las parejas establecidas.

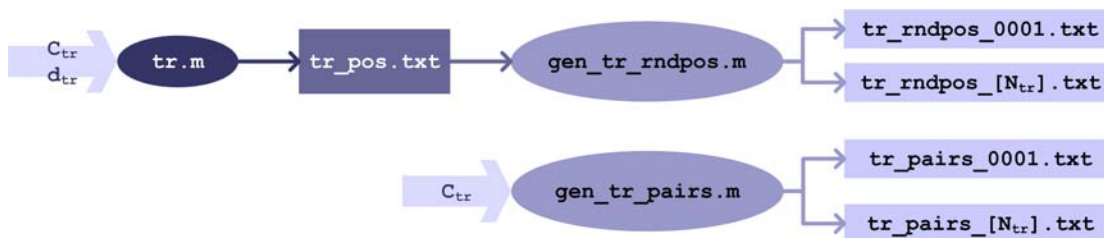


FIGURA 5.8: Diagrama de interrelación de programas Matlab y ficheros de texto de entrada y/o salida para la generación de escenarios basados en una topología triangular

Con el fin de detallar este proceso de generación de escenarios, la descripción de los ficheros empleados en el caso de la topología triangular se presenta a continuación:

- **tr.m.** Programa Matlab en el que dada la distancia d_{tr} entre nodos vecinos y el número de capas C_{tr} , se calculan las posiciones de los nodos dentro de la topología regular triangular y se almacenan en el fichero **tr_pos.txt**.
- **tr_pos.txt.** Fichero de texto que recoge las posiciones originales de los nodos en ausencia del factor de desplazamiento. Las ubicaciones de los nodos están expresadas en formato de coma flotante con precisión doble. Al último nodo se le asigna la posición (0,0;0,0). El emplazamiento de cada nodo se almacena en dos líneas: la primera indica la posición en el eje X y la siguiente posición en el eje Y, de tal modo que la posición del nodo n_{tr} , $1 \leq n_{tr} \leq N_{tr}$ queda definida en las líneas $2n_{tr} - 1$ y $2n_{tr}$, tal y como se muestra a continuación:

```

Coordenada X inicial del nodo 1
Coordenada Y inicial del nodo 1
Coordenada X inicial del nodo 2
Coordenada Y inicial del nodo 2
...
Coordenada X inicial del nodo N
Coordenada Y inicial del nodo N
  
```

- **gen_tr_randpos.m.** Programa Matlab que recibe como entrada el fichero **tr_pos.txt**. Su función es añadir el factor de desplazamiento sobre las posiciones originales de los nodos expuesto en la Sección 5.2.4. Para cada una de las posiciones, suma una cantidad aleatoria de media 0 y desviación típica σ . Genera N ficheros, de nombre **tr_pairs_XXXX.txt**, siendo **XXXX** una cadena de texto de cuatro dígitos en el rango $[1, N_{tr}]$.

- **tr_randpos_XXXX.txt.** Fichero de texto que recoge las posiciones de los nodos tras aplicar el factor de desplazamiento. Su formato es idéntico al del fichero **tr_pos.txt**:

```

Coordenada X final del nodo 1
Coordenada Y final del nodo 1
Coordenada X final del nodo 2
Coordenada Y final del nodo 2
...
Coordenada X final del nodo N
Coordenada Y final del nodo N
    
```

- **gen_tr_pairs.m.** Programa Matlab en el que dado el número de capas C_{tr} , se seleccionan aleatoriamente parejas de nodos para ejercer los papeles de origen y destino, almacenando los identificadores de las parejas generadas en los ficheros **tr_pairs_XXXX.m**.
- **tr_pairs_XXXX.txt.** Cada uno de los N_{tr} ficheros de texto contiene $N_{tr}-1$ parejas. Cada fichero resultante cuenta con $2(N_{tr}-1)$ líneas, puesto que una pareja se indica en dos líneas: la primera indica el identificador del nodo origen y la siguiente la del nodo destino, tal y como se muestra a continuación:

```

Identificador del nodo Src de la pareja 1
Identificador del nodo Dst de la pareja 1
Identificador del nodo Src de la pareja 2
Identificador del nodo Dst de la pareja 2
...
Identificador del nodo Src de la pareja N-1
Identificador del nodo Dst de la pareja N-1
    
```

Para la topología cuadrada se procede de igual modo, partiendo de las variables d_{sq} , C_{sq} y N_{sq} y a través de los ficheros **sq.m**, **sq_pos.txt**, **gen_sq_randpos.m**, **sq_randpos_XXXX.txt**, **gen_sq_pairs.m** y **sq_pairs_XXXX.txt**, como se indica en la Figura 5.9:

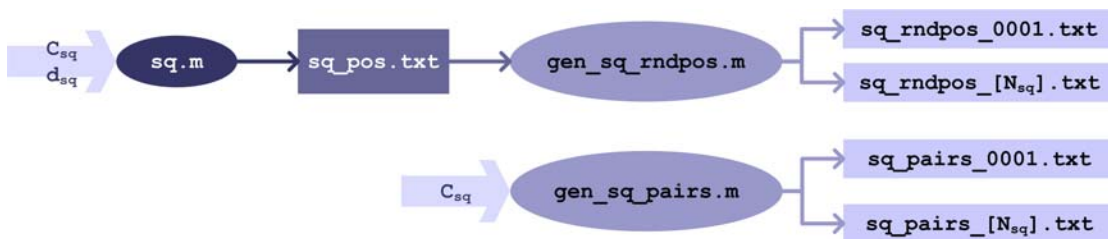


FIGURA 5.9: Diagrama de interrelación de programas Matlab y ficheros de texto de entrada y/o salida para la generación de escenarios basados en una topología cuadrada

5.3.3. Configuración de la herramienta de simulación de red ns-2

La versión instalada del simulador de red ns-2 es la versión 2.33, última versión estable en la fecha de inicio del proyecto. Previo a la instalación de la herramienta, es necesario alterar uno de los parámetros de la implementación del protocolo AODV para adaptar la configuración del simulador ns-2 a los objetivos del proyecto. Concretamente, el parámetro modificado es el diámetro de la red, que como se observó en la Sección 3.6, viene dado por la variable NET_DIAMETER y expresa el número máximo de saltos entre dos nodos de la red. El documento RFC3561 observa que este valor es, por defecto, 35, aunque la actual versión de ns-2 lo establece a 30.

Para el desarrollo de estos experimentos es preciso que este valor sea superior al diámetro de la red en todos los escenarios, para permitir la comunicación entre dos nodos ubicados en extremos diametralmente opuestos. La red más extensa se da en el escenario triangular de 1387 nodos, ya que su diámetro es de $D = 43$ nodos. Por tanto, este valor se establece a 45.

Para modificar este parámetro se examinaron los ficheros en los que se confina la configuración del protocolo AODV, y en especial aquellos ficheros de cabeceras que almacenan las constantes de las librerías: `aodv_rtable.h`, `aodv.h`, `aodv_packet.h` y `aodv_rqueue.h`. La asignación del valor la variable NET_DIAMETER se localiza en el fichero de cabeceras principal, `aodv.h`.

5.3.4. Edición del *script* de usuario

El modo en el que un usuario describe el escenario que desea modelar es a través de un *script* escrito en lenguaje OTcl, cuya ubicación en el sistema de ficheros se pasa como argumento en la ejecución del simulador de red ns-2. El contenido de este *script* se rige por una estructura secuencial que se expone a continuación:

1. **Definición de opciones.** El tipo de canal establecido es un canal inalámbrico de acuerdo a un modelo de propagación en espacio libre. Las especificaciones del control de acceso al medio inalámbrico (MAC, *Medium Access Control*) y de la capa física siguen el estándar IEEE 802.11 o Wi-Fi. El modelo de antena es omnidireccional. En esta parte es necesario fijar el tiempo de ejecución del simulador ns-2. Se trata de un parámetro delicado, ya que si su valor es muy alto, el intercambio de paquetes finaliza pero el simulador pasa a un estado ocioso en el que consume tiempo de procesamiento sin generar resultados. Por el contrario, si este valor es pequeño, las simulaciones acaban antes de completarse. Por ello, es preciso

efectuar una simulación de prueba para cada uno de los escenarios, tomando un valor holgadamente superior a la marca de tiempos del último paquete recibido.

2. **Asignación de valores a los atributos empleados.** La potencia de transmisión del nivel físico es de 0.1W. El número de nodos se fija al valor correspondiente de N , con un número de parejas $N - 1$. Cada pareja representa una realización del experimento, por lo que para cada ejecución de los *scripts* se establecen $N - 1$ comunicaciones entre dos nodos seleccionados aleatoriamente.
3. **Configuración del formato y contenido del fichero de salida.** El simulador de red ns-2 proporciona dos formatos para el fichero de trazas creadas en entornos inalámbricos. Uno de los formatos es la versión mejorada del otro, siendo la nueva versión compatible hacia atrás. El formato por defecto es el antiguo, por lo que en esta parte del código es necesario habilitar el nuevo formato. Asimismo, el simulador ns-2 considera tres tipos de niveles de trazas atendiendo a tres niveles dentro de la pila de protocolos de la torre OSI (*Open System Interconnection*): nivel físico y enlace, nivel de red y niveles superiores, ya sea de transporte o de aplicación. En este caso se habilitan los tres tipos de trazas con el fin de obtener la mayor cantidad de datos posibles.
4. **Definición de las posiciones de los nodos.** El *script* lee las posiciones de los nodos de los ficheros `tr_randpos_XXXX.txt` o `sq_randpos_XXXX.txt` según corresponda.
5. **Definición del patrón de tráfico** El patrón de tráfico está determinado por la pareja formada por el nodo fuente y el nodo sumidero de la información, la especificación del protocolo de la capa de transporte y el protocolo de aplicación o tipo de tráfico. El *script* obtiene la información sobre las parejas en forma de identificadores extraídos de los ficheros `tr_pairs_XXXX.txt` o `sq_pairs_XXXX.txt` según corresponda. El modelo de comunicación de cada pareja se basa en el envío y recepción de un solo paquete de datos sobre el protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) sobre el cual se transmite un flujo constante de datos (CBR, *Constant Bit Rate*). El tamaño del paquete es de 128 bytes y se envía cada cuatro segundos, lo que da lugar a una tasa de datos de 256bps. Además se introduce ruido aleatorio para modelar las interferencias del canal inalámbrico.
6. **Arranque de la simulación.** Para concluir, se indica que la simulación debe detenerse una vez se hayan completado todas las comunicaciones programadas para cada una de las parejas y a continuación se arranca la simulación.

5.3.5. Automatización de las simulaciones

Como ya se ha mencionado en anteriores ocasiones, cada una de las ejecuciones del simulador de red ns-2 genera como salida un fichero de trazas, en el que se incluye la información contenida en los mensajes intercambiados por los integrantes de la red durante la comunicación. En este caso concreto, cada uno de los ficheros de trazas incluye todos los mensajes de control del protocolo AODV intercambiados por los N nodos que se asocian en parejas de manera aleatoria dando lugar a $N - 1$ comunicaciones. El modo en el que se almacena la información en el fichero de trazas es un formato inteligible por un ser humano, de tal manera que los datos se pueden interpretar manualmente más tarde.

La simulación de una sola red de gran escala, debido al alto número de nodos, incurre en una elevada carga computacional que se manifiesta en tiempos de ejecución elevados y en ficheros de trazas voluminosos. Por ejemplo, en el caso de la topología triangular para 1387 nodos, los ficheros de trazas tienen un tamaño en torno a los 6,4GB y para cada una de las trazas, la simulación consume casi 12 horas en completarse. No ha de olvidarse que cada una de las trazas generadas ha de someterse a un proceso de filtrado de datos para eliminar la información irrelevante y ha de comprimirse para ahorrar espacio de almacenamiento, lo cual incurre en un incremento del tiempo de procesamiento.

En adición a esto, ha de subrayarse que con el fin de adquirir un conjunto representativo de datos, se efectuaron numerosas simulaciones. Concretamente, en el caso de las topologías triangulares se llevaron a cabo en torno a 250 realizaciones. En el caso de las topologías cuadradas se obtuvieron más de 600 trazas. Este elevado consumo de tiempo de procesamiento hace que esta tarea sea inviable en una sola estación de trabajo. Como se mencionó en la Sección 4.1, se contó con doce máquinas adicionales para llevar a cabo la generación y filtrado de datos: en once de ellas se efectuó la generación masiva de datos, usando el duodécimo equipo como pasarela, ya que los nodos de procesamiento no son accesibles desde el exterior. El uso intensivo de estas máquinas reside en la ejecución automática de las simulaciones. La automatización de las simulaciones pasa por la ejecución de diferentes *scripts* programas en BASH (*Bourne-Again SHell*). El término BASH designa al intérprete de comandos (*shell*) para los sistemas operativos GNU (*GNU is Not Unix*). El nombre del intérprete es un juego de palabras con el nombre de Stephen Bourne, autor del intérprete sh, antecesor del actual BASH [76]. Dentro de estos *scripts* se realizan tareas que hacen uso de diversos comandos Unix. Por ejemplo, se emplea la utilidad ssh para acceder y ejecutar comandos en una máquina remota en modo textual. El comando rsync permite copiar ficheros de o desde máquinas locales a máquinas remotas. La herramienta tar permite agregar o extraer ficheros de un archivo comprimido. En concreto se emplean tres *scripts* para la ejecución de las simulaciones,

de nombres `complete_run.sh`, `single_run.sh` y `run.sh`. La necesidad de crear varios *scripts* reside en que las funciones que han de llevarse a cabo para la automatización de las simulaciones recaen en diferentes máquinas, y además, se prefiere optar por una arquitectura modular para facilitar la reutilización de los mismos. Las siguientes líneas detallan la funcionalidad de cada uno de estos *scripts*.

El *script* `complete_run.sh` arranca el proceso completo de la ejecución automática de las simulaciones y se ejecuta en el nodo pasarela. Se trata de un programa genérico cuya función es ejecutar otro programa más específico, llamado `single_run.sh`, que inicia a su vez las simulaciones en los diferentes nodos de procesamiento. El *script* `complete_run.sh` realiza once iteraciones en su ejecución, una por cada equipo de procesamiento empleado. Puesto que el programa *script* `single_run.sh` necesita como primer y único argumento una dirección IP, el *script* `complete_run.sh`, en cada una de las iteraciones, produce las direcciones IP de los nodos de procesamiento e invoca el *script* `single_run.sh` con cada una de ellas como parámetro. El diagrama de flujo asociado al *script* `complete_run.sh` se muestra en la Figura 5.10.

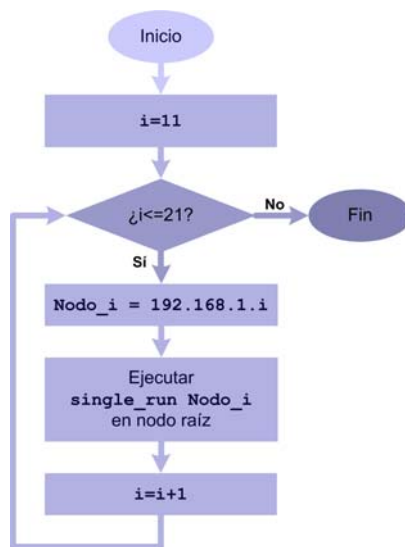


FIGURA 5.10: Diagrama de flujo del *script* `complete_run.sh`

El *script* `single_run.sh` también se ejecuta en el nodo pasarela y su función es copiar los ficheros necesarios desde el nodo pasarela a cada nodo de procesamiento y a continuación lanzar el *script* `run.sh`, que controla la ejecución de las simulaciones en cada uno de los nodos de procesamiento. En primer lugar se copia el propio *script* `run.sh` y a continuación los ficheros de los que hace uso durante su ejecución: el *script* de usuario de ns-2, de extensión `.tcl`, y el fichero de postprocesamiento, con extensión `.m`. El diagrama de flujo del *script* `single_run.sh` se muestra en la Figura 5.11.

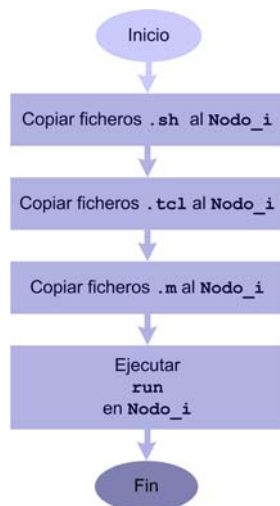


FIGURA 5.11: Diagrama de flujo del *script* `single_run.sh`

En el *script* `run.sh` reside toda la funcionalidad necesaria para la obtención de datos. Antes de ejecutar el *script*, es necesario particularizarlo a cada uno de los escenarios, considerando los parámetros relativos a la topología y al número de nodos. El *script* `run.sh` es un programa iterativo en el que en cada una de las realizaciones se pueden distinguir cuatro fases que se detallan a continuación:

1. **Generación del fichero de trazas.** Se toma el *script* de usuario definido en la Sección 5.3.4 y se modifican los nombres del fichero de trazas y de los ficheros que indican las posiciones y las parejas. Con el objeto de controlar el tiempo de simulación, se lanza un temporizador previo al arranque del simulador `ns-2`. Una vez finalizada la simulación se computa el tiempo transcurrido en cada ejecución del simulador `ns-2`.
2. **Filtrado del fichero de trazas.** Para llevar a cabo el postprocesamiento del fichero de trazas, se invoca la herramienta `Matlab` y se obtiene un fichero denominado fichero de rutas. El procedimiento del filtrado de trazas se describe en la Sección 5.3.6.
3. **Compresión del fichero de trazas.** Los ficheros de trazas resultantes tienen un tamaño comprendido entre los 4GB y los 6,5GB, por lo que se hace necesario comprimirlos previamente para poder almacenarlos. Aún así, el tamaño del conjunto de las trazas comprimidas es de unos 400GB.
4. **Traslado de los datos resultantes a un dispositivo de almacenamiento masivo local.** La copia del fichero de trazas y del fichero de rutas a un disco duro local se realiza en dos pasos. Primeramente, se copian los archivos resultantes del nodo de procesamiento al nodo pasarela, y en segundo lugar, se copian del nodo

pasarela al dispositivo local de alta capacidad. Tras efectuar la copia, se borran los ficheros del nodo pasarela y del correspondiente nodo de procesamiento para evitar un consumo innecesario de espacio en disco.

El diagrama de flujo representado en la Figura 5.12 muestra la funcionalidad del *script run.sh* particularizado para la generación de datos de una topología triangular. No es preciso llevar a cabo las $N \times (N - 1)$ realizaciones para tener suficiente representación estadística, por lo que `tr_min` denota el número de la primera simulación y `tr_max` el de la última simulación realizada.

5.3.6. Filtrado de datos

La fase de filtrado de datos consiste básicamente en tomar la traza resultante de cada una de las simulaciones, extraer la información que sirve de base para medir la eficiencia de encaminamiento y efectuar sobre ésta ciertos cálculos para obtener los valores del cociente R/L . Este postprocesamiento de trazas se realiza con la herramienta *Matlab* y se genera un fichero de salida con extensión `.mat`.

En primer lugar, y con objeto de obtener los datos relevantes, `single run.sh` se efectúa un procesamiento textual puesto que el fichero de trazas resultante de cada de las simulaciones no es más que un fichero de texto. Como se indicó en la Sección 4.2.2, el simulador `ns-2` está basado en eventos, entendiéndose por evento cualquier acción que realiza un nodo, como el envío o recepción de un paquete. Con cada uno de los eventos que se producen durante la simulación, se genera una línea en el fichero de trazas. Los ficheros de trazas obtenidos tienen varias decenas de millones de líneas. A continuación se ofrece un extracto de una de las trazas obtenidas:

```
s -t 25.012665117 -Hs 433 -Hd -2 -Ni 433 -Nx -2280.22 -Ny -2346.35 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -Nl RTR -Nw
--- -Ma 0 -Md ffffffff -Ms 169 -Mt 800 -Is 433.255 -Id -1.255 -It AODV -Il 48 -If 0 -Ii 0 -Iv 43 -P
aodv -Pt 0x2 -Ph 3 -Pb 1 -Pd 415 -Pds 0 -Ps 307 -Pss 4 -Pc REQUEST
r -t 25.086077170 -Hs 858 -Hd -2 -Ni 858 -Nx -4339.98 -Ny -1281.08 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -Nl MAC -Nw
--- -Ma 0 -Md ffffffff -Ms 34e -Mt 800 -Is 846.255 -Id -1.255 -It AODV -Il 48 -If 0 -Ii 0 -Iv 35 -P
aodv -Pt 0x2 -Ph 11 -Pb 1 -Pd 415 -Pds 0 -Ps 307 -Pss 4 -Pc REQUEST
...
f -t 44345.285097692 -Hs 117 -Hd 81 -Ni 117 -Nx 573.72 -Ny -1554.91 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -Nl RTR -Nw
--- -Ma 13a -Md 75 -Ms 93 -Mt 800 -Is 719.2 -Id 24.1 -It cbr -Il 148 -If 0 -Ii 1385 -Iv 33 -Pn cbr -Pi
0 -Pf 12 -Po 0
```

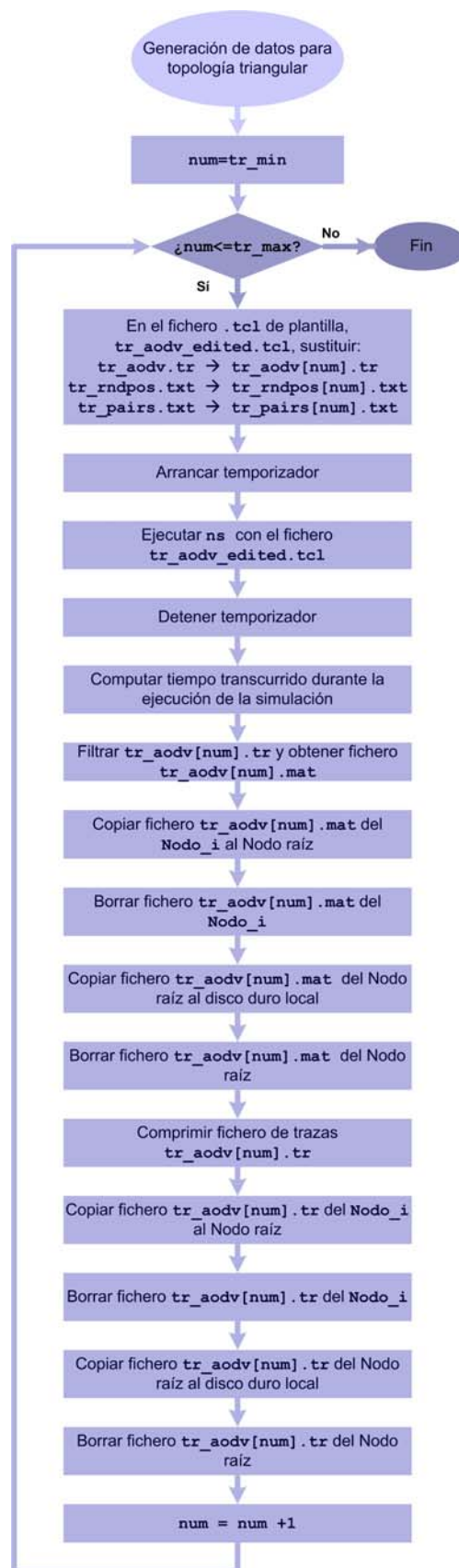


FIGURA 5.12: Diagrama de flujo del script run.sh

Como se puede apreciar, en el nuevo formato de trazas que proporciona ns-2, cada línea es un conjunto de datos organizados en pares etiqueta-valor, para facilitar el procesamiento de las trazas *a posteriori*. A continuación se presentan los siete tipos de etiquetas que existen en ns-2 y para cada uno de estos tipos, se indican cuáles son las etiquetas consideradas para el postprocesamiento:

- **Tipo de evento.** Indica el evento que se produce en el nodo y que da lugar a la escritura de esta línea en la traza. Puede tratarse de un evento de envío (**s**), recepción (**r**), descarte (**d**) o reenvío (**f**) de un paquete. Aquí se consideran los paquetes enviados, recibidos y reenviados.
- **Etiqueta general.** Típicamente indica una marca de tiempos (**-t time**). Comienza en 0.000000000 y finaliza en el valor del tiempo de ejecución de la simulación indicado en el *script* de usuario.
- **Etiquetas de propiedades de los nodos.** Indican propiedades particulares de cada nodo. Se tienen en cuenta las etiquetas que señalan el identificador del nodo (**-Ni**), las coordenadas en abcisas (**-Nx**), ordenadas (**-Ny**) y azimuth (**-Nz**) del nodo. También se considera la etiqueta de nivel de traza (**-Nl**), que señala si se trata de una trama de nivel físico y enlace (**MAC**), de nivel de red (**RTR**) o de niveles superiores (**AGT**). En este caso sólo se seleccionan las trazas de niveles superiores, que son las que incluyen la información de encaminamiento del protocolo AODV.
- **Información de paquete a nivel IP.** Acompañan a la dirección IP y número de puerto de la fuente (**-Is**), dirección IP y número de puerto del destino (**-Id**), identificador único de paquete (**-Ii**) y valor de TTL (**-Iv**). Las etiquetas que hacen alusión al tipo de paquete (**-It**) y al tamaño del paquete (**-Il**) aquí no se tienen en cuenta.
- **Información sobre el siguiente salto.** Se refieren al identificador de este nodo (**-Hs**) y al identificador del nodo que supone el siguiente salto hacia el destino (**-Hd**).
- **Información de paquete a nivel MAC.** Hacen referencia a la dirección física del origen (**-Ms**) y del destino (**-Md**). La información proporcionada por estas etiquetas es aquí irrelevante.
- **Información de paquete a nivel de aplicación.** Incluye la información concerniente al protocolo encapsulado sobre IP, que es en este caso el protocolo AODV. Se consideran parámetros tales como el número de secuencia (**-Pi**), el número de ocasiones en las que se ha reenviado el paquete (**-Pf**) y el número óptimo de

reenvíos (-Po). En el postprocesamiento sólo se tiene en cuenta el número de reenvíos, ya que aporta información acerca del número de nodos que componen la ruta desde el nodo origen hasta el nodo destino.

Puesto que en el fichero de configuración de parejas que se proporciona como entrada al programa ns-2 se incluyen $N - 1$ parejas, en cada simulación se tratan de establecer $N - 1$ comunicaciones. Sin embargo, no siempre es posible establecer una ruta, ya que gracias a los mecanismos que proporciona el protocolo AODV, se realiza un número de intentos máximos antes de considerar un destino como inalcanzable. El postprocesamiento calcula, en primer lugar y para cada uno de los caminos establecidos, la secuencia de nodos que componen esa ruta desde el nodo origen hasta el destino, teniendo en cuenta el valor del número de saltos H . A continuación, se va computando el valor de L , registrando la distancia salto a salto. Por otro lado, R se calcula como la distancia euclídea entre la posición del nodo origen y la posición del nodo destino. Finalmente, se calcula el cociente R/L , que supone la base del análisis de resultados.

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo describe el proceso de obtención de resultados. Las prestaciones del protocolo bajo estudio se concretan cualitativa y cuantitativamente, determinando de forma numérica la eficiencia de encaminamiento bajo diferentes configuraciones de red. Para comenzar, en la Sección 6.1, se describe formalmente la metodología empleada para el tratamiento de los datos de los que se dispone. En la Sección 6.2, se interpretan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios considerados.

6.1. Método

El análisis de los resultados se realiza desde un enfoque estadístico y se fundamenta en la comparación de los datos obtenidos empíricamente con las distribuciones obtenidas de modo teórico bajo la línea de investigación de encaminamiento en redes *ad hoc* inalámbricas que se lleva a cabo en el departamento. Esta comparación se realiza a partir del parámetro denominado radio de persistencia ξ como medida de la eficiencia de encaminamiento, parámetro ya introducido en la Sección 5.1. Como refleja la ecuación (5.5), el parámetro ξ depende de los factores de directividad, κ , y movilidad, β , para una dimensión D . Puesto que el estudio de la movilidad no es objeto de este proyecto, la interpretación del parámetro ξ se puede realizar en términos de directividad.

Puesto que se busca construir un parámetro independiente de la longitud real del camino L , de ahora en adelante se considerará el parámetro ξ normalizado al valor de L , dando lugar al parámetro denominado radio de persistencia normalizado, que se denotará como ξ/L .

Esto se debe a que sólo en una red regular con alcance a primeros vecinos se tiene que $L = d_1 v \cdot H$. Por el contrario, en una red con cobertura a segundos vecinos, la

magnitud escalar L no es directamente proporcional a la distancia d_1v , sino que es una combinación lineal de las distancias a primeros d_1v y segundos vecinos d_2v . Por esta razón, se hace más apropiado trabajar con el parámetro normalizado. A continuación se ofrecen una descripción detallada de la metodología llevada a cabo.

6.1.1. Estructura de los datos obtenidos con el modelo teórico

Los datos proporcionados son los valores numéricos de las funciones de densidad de probabilidad (PDF, *Probability Density Function*) teóricas de la v.a. continua $Z^t = R/L$, ρ_Z^t , donde el superíndice t indica teórica. No se cuenta con una expresión analítica de la PDF, sino que sólo se dispone de 200 valores numéricos para puntos del espacio muestral equiespaciados 0.005, con $z^t \in [0,005, 1]$.

Se dispone de dos modelos, uno para dos dimensiones (2D) y otro para tres dimensiones (3D). El hecho de que se trabaje con dos modelos teóricos está vinculado al concepto de número de coordinación, también denominado número de Newton o número de osculación (*Kissing Number*). El número de coordinación se define como el número de hiperesferas equivalentes en un espacio D-dimensional que están en contacto con otra hiperesfera equivalente sin intersecciones [77]. En dos dimensiones, el mínimo número de coordinación es 4, mientras que el máximo es 6. Para tres dimensiones, el mínimo número de coordinación es también 4, siendo 12 el máximo [78].

Para cada uno de los dos modelos se dispone de una colección de PDFs caracterizadas por el parámetro ξ/L , $\rho_Z^{t,2D}$ y $\rho_Z^{t,3D}$. El parámetro ξ/L determina la *forma* de las PDFs, de modo que cuanto mayor es el valor de ξ/L , más se desplaza la moda de las PDFs hacia la derecha. Concretamente, para el modelo de 2D, se cuenta con 99 PDFs, con valores de ξ/L múltiplos de 0,01 y comprendidos en el rango $[0,01, 0,99]$. Por su parte, para el modelo de 3D, se cuenta con 249 PDFs, con valores de ξ/L también múltiplos de 0,01 y comprendidos en el rango $[0,01, 2,49]$. En la Figura 6.1 se muestra un ejemplo de diferentes curvas teóricas del modelo de 2D, $\rho_Z^{t,2D}$, para quince valores de ξ/L uniformemente distribuidos en el rango $[0,01, 0,99]$.

Para cada uno de los escenarios de redes *ad hoc* considerados en el proyecto y para cada valor de H , ha de hallarse qué distribución teórica, $\rho_Z^{t,2D}$ o $\rho_Z^{t,3D}$, describe mejor la distribución de los datos experimentales y, en consecuencia, cuál es el valor óptimo de ξ/L .

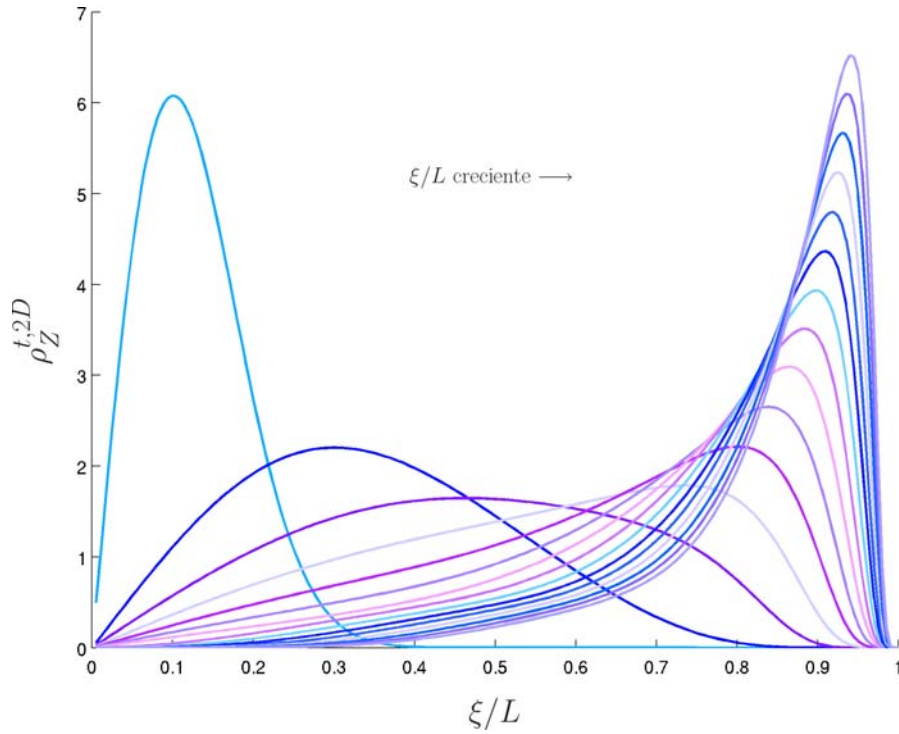


FIGURA 6.1: Curvas teóricas pertenecientes al modelo de 2D, $\rho_Z^{t,2D}$, para los valores $\xi/L = 0,01, 0,08, 0,15, 0,22, 0,29, 0,36, 0,43, 0,50, 0,57, 0,64, 0,71, 0,78, 0,85, 0,92$ y $0,99$

6.1.2. Estructura de los datos obtenidos experimentalmente

Los datos, fruto de las simulaciones realizadas con la herramienta ns-2 y el posterior filtrado, consisten en un conjunto de valores del cociente R/L en el rango $(0, 1]$. Se indicó en la Sección 5.1 que, en redes de distribución regular, la longitud de la ruta real L es directamente proporcional al número de saltos H , siendo el factor de proporcionalidad la distancia a primeros vecinos d , $L = d_{1v} \cdot H$. Como cabe esperar, la situación más favorable para que el cociente R/L sea más próximo a la unidad se da para valores reducidos de H . Por el contrario, si H es muy elevado, la probabilidad de que los valores de R y L coincidan es muy reducida. Por ello, el estudio se enfoca atendiendo al número de saltos H .

Como se detalló en la Sección 5.3.1, los escenarios simulados fueron cuatro. Pese a que en primer lugar se ejecutaron las simulaciones de los escenarios con topología triangular y a continuación los de topología cuadrada, conviene alterar este orden con el fin de adaptarlo a un flujo más intuitivo en la exposición de los resultados. A continuación se presentan las características de los distintos escenarios en el orden seguido de ahora en adelante:

1. **Escenario 1.** Topología cuadrada ($\{4, 4\}$), $N = 1089$ nodos, $D = 33$ nodos, $d_{1v} = 320m$ de distancia entre nodos adyacentes, factor de desplazamiento $\sigma = 0$ y alcance a primeros vecinos.
2. **Escenario 2.** Topología cuadrada ($\{4, 4\}$), $N = 1089$ nodos, $D = 33$ nodos, $d_{1v} = 300m$ de distancia entre nodos adyacentes, factor de desplazamiento $\sigma = 0$ y alcance a segundos vecinos.
3. **Escenario 3.** Topología triangular ($\{3, 6\}$), $N = 919$ nodos, $D = 35$ nodos, $d_{1v} = 300m$ de distancia entre nodos adyacentes, factor de desplazamiento $\sigma = 20$ y alcance a primeros vecinos.
4. **Escenario 4.** Topología triangular ($\{3, 6\}$), $N = 1387$ nodos, $D = 43$ nodos, $d = 300m$ de distancia entre nodos adyacentes, factor de desplazamiento $\sigma = 20$ y alcance a primeros vecinos.

Para cada escenario, se toman los valores de R/L obtenidos en cada una de las comunicaciones establecidas entre una pareja de nodos. Estos valores se agrupan a continuación atendiendo al número de saltos H , que toma a su vez valores en el rango $[2, 45]$. El caso correspondiente a $H = 1$ se obvia puesto que en este caso siempre se tiene $R/L = 1$. La Tabla 6.1 muestra el número de valores de R/L obtenidos en cada escenario en función de H . La última fila incluye los valores de R/L diferentes para todos los valores de H .

A partir de los datos presentados en la Tabla 6.1 se elabora la Figura 6.2, que muestra el histograma del cociente R/L en función del número de saltos H considerados para cada escenario. Como se puede apreciar, el mayor número de valores de R/L se concentra en la región central del rango de H .

Puesto que la elección de las parejas de nodos origen y destino se realiza de manera aleatoria, el número de saltos H de una ruta es una v.a. discreta. La probabilidad de que una ruta esté compuesta por H saltos se expresa mediante la función de distribución de probabilidad o función de masa de probabilidad (PMF, *Probability Mass Function*) de esta v.a. H , p_H . Experimentalmente, la probabilidad de que una ruta esté formada por un número de saltos H se calcula como el cociente entre el número de valores de R/L para ese número de saltos H y el número total de valores del cociente R/L . La Figura 6.3 contrapone las p_H para cada escenario. Como se puede apreciar, en cualquiera de los casos, las PMF tienen forma acampanada. Para el Escenario 1 y el Escenario 3, se obtienen probabilidades relativamente altas para un número de saltos elevado, mientras que en el Escenario 2 y en el Escenario 4, las probabilidades para estos valores de los saltos son ínfimas. Para el Escenario 2, la razón se encuentra en que la cobertura alcanza

H	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
2	2484	1594	4394	2321
3	3541	2275	6096	3066
4	4120	2572	7421	3809
5	4877	3005	8956	4442
6	5547	3326	10318	5306
7	6427	3851	11666	5800
8	7109	4238	12953	6221
9	7598	4531	13944	6606
10	8404	4931	15063	6878
11	8758	5072	16182	7381
12	9446	5295	16810	7634
13	9900	5419	17812	7942
14	10280	5636	18264	7932
15	10504	5568	18895	8030
16	11071	5740	19501	8078
17	11015	5631	20003	8145
18	11141	5473	20180	7958
19	11293	5497	20127	7990
20	11323	5246	20151	7616
21	11156	5031	20408	7586
22	11241	5006	20389	7186
23	11067	4873	19982	7045
24	11154	4533	19958	6405
25	10926	4242	19628	6126
26	10473	4012	19379	5746
27	10066	3600	18837	5256
28	9910	3415	18393	4696
29	9612	3120	17754	4156
30	9182	2631	17191	3715
31	8724	2395	16663	3204
32	8127	2031	15843	2552
33	7792	1734	14695	1848
34	7414	1366	14033	1353
35	6823	1102	12864	1006
36	6305	787	12157	709
37	5851	552	11148	490
38	5452	354	10119	349
39	5049	238	9282	252
40	4383	141	8364	175
41	4202	93	7406	111
42	3739	52	7075	82
43	3417	33	6192	53
44	3231	22	6773	38
45	3253	14	5902	35
Total	343387	136277	629171	193329
No repetidos	1112	11536	66296	168199

TABLA 6.1: Número de valores R/L en función del escenario y del número de saltos

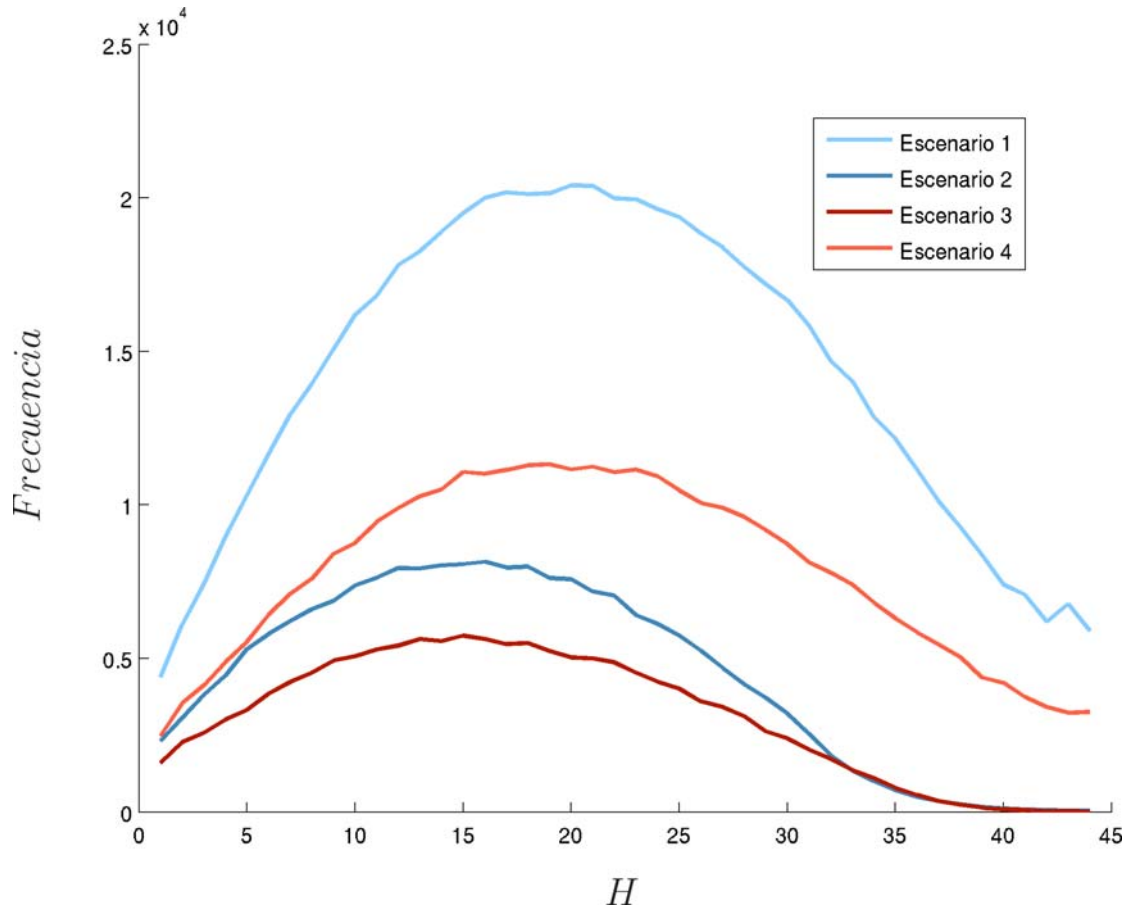


FIGURA 6.2: Número de valores de R/L en función del número de saltos H para cada escenario

a segundos vecinos, lo que propicia que cualquier ruta se complete en un número de saltos menor que en el caso de tener alcance sólo a primeros vecinos. Por su parte, el diámetro del Escenario 4 es de $D = 35$ nodos, lo que dificulta que existan rutas de un número de saltos muy superior a este valor.

Dado que los valores del cociente R/L obtenidos empíricamente son aleatorios, se define la v.a. $Z^e = R/L$, donde el superíndice e indica experimental. Es necesario enfatizar en primer lugar que los valores de la v.a. Z^e no tienen por qué coincidir con los de la v.a. Z^t . En segundo lugar, mientras que Z^t es una v.a. continua, Z^e es una v.a. discreta, debido a que las simulaciones se han realizado con redes regulares.

6.1.3. Tratamiento de los datos obtenidos experimentalmente

Para la manipulación e interpretación de los datos experimentales es necesario determinar la distribución de la v.a. Z^e condicionada al número de saltos H , esto es: $Z^e|H$. Una primera aproximación es caracterizar los datos empíricos mediante su PDF, ya que

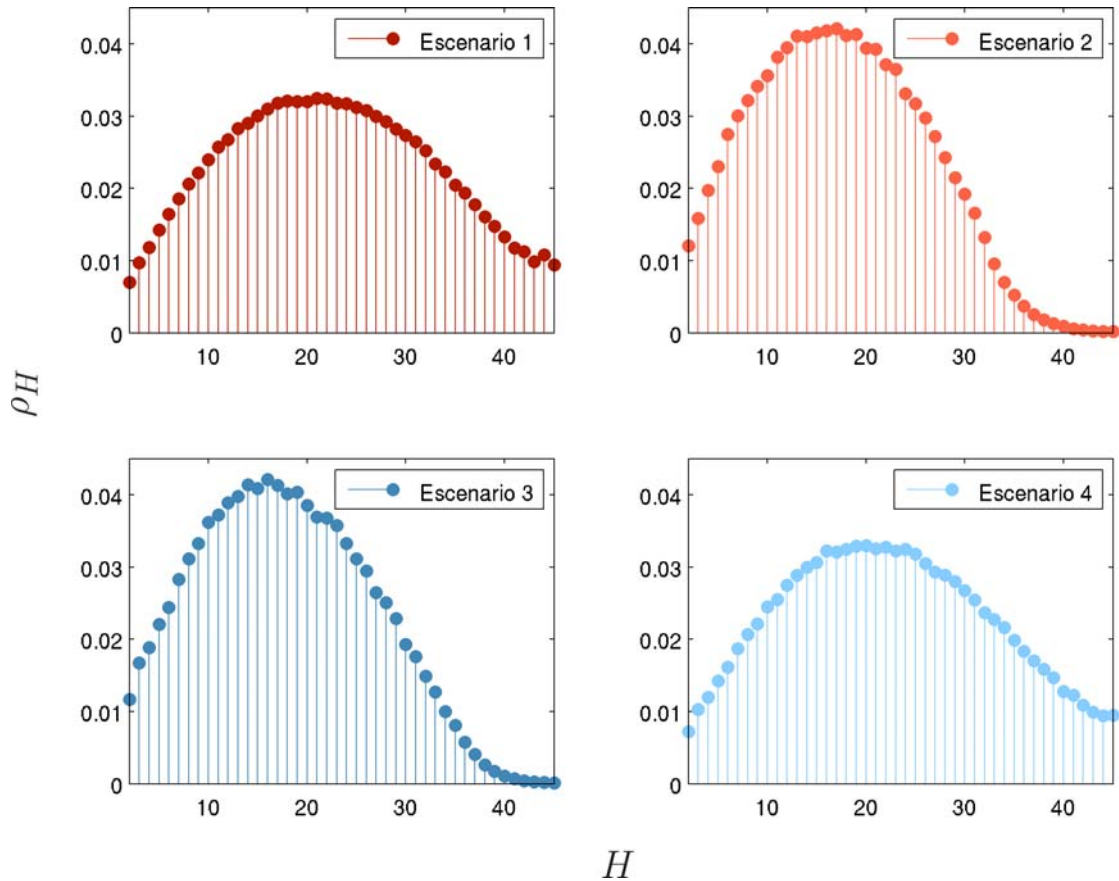


FIGURA 6.3: Distribución de probabilidad del número de saltos H , ρ_H , para cada escenario

los valores teóricos están así modelados. La estimación de la PDF de los datos experimentales se puede obtener a partir de su histograma normalizado; como ejemplo, la Figura 6.4 muestra el histograma correspondiente a $H = 6$ para el Escenario 1. Como se señaló en la Sección 5.2.4, en un escenario donde el factor de desplazamiento es nulo, se tiene un conjunto reducido de valores R/L . Por tanto, debido a que los nodos del Escenario 1 son perfectamente equidistantes, se tiene un conjunto escaso de valores de la v.a. $Z^e|H$, valores que cubren sólo una pequeña parte del espacio muestral $z^e \in (0, 1]$.

En la Figura 6.5 se presenta el histograma correspondiente al Escenario 4 para el mismo número de saltos que los considerados en la Figura 6.4. Obsérvese cómo la introducción del factor de desplazamiento aumenta el número de valores diferentes de la v.a. Z^e , dando lugar a una mayor representatividad estadística y a una mejor comparación con los modelos de distribución para espacio continuo.

A la vista de la Figura 6.4, se puede afirmar que en escenarios con nodos equidistantes no es conveniente modelar la v.a. Z^e a través de una estimación de la PDF, ya que sólo se dispone de un conjunto reducido de valores. Puesto que, en estos escenarios,

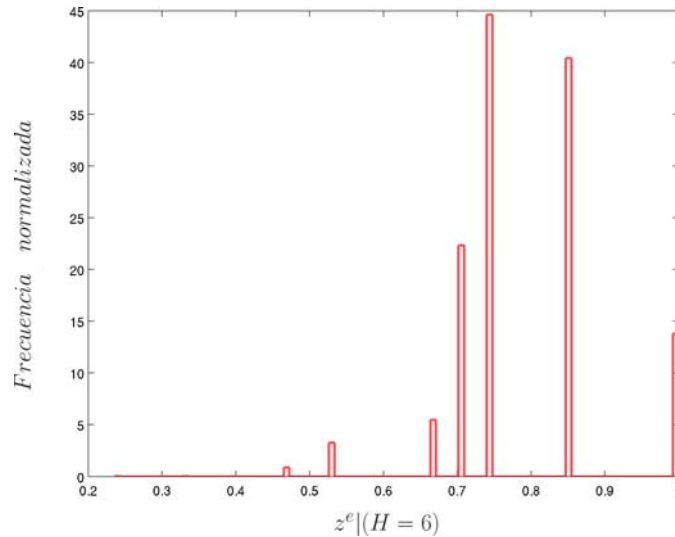


FIGURA 6.4: Escenario 1. Histograma normalizado de la v.a. $Z^e | (H = 6)$

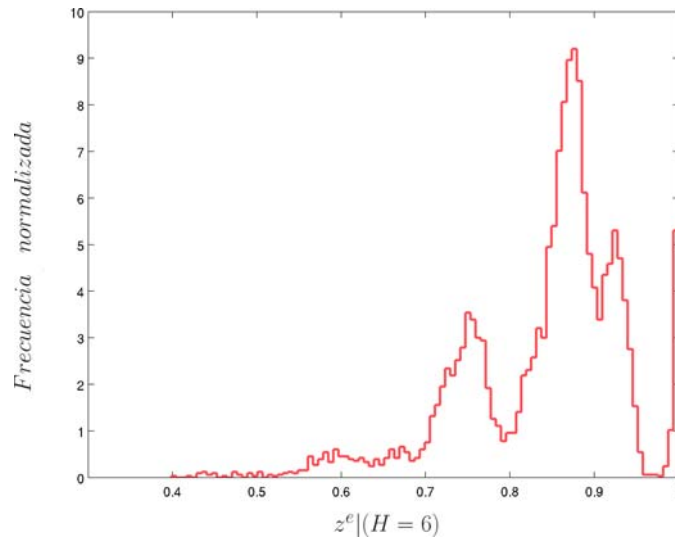
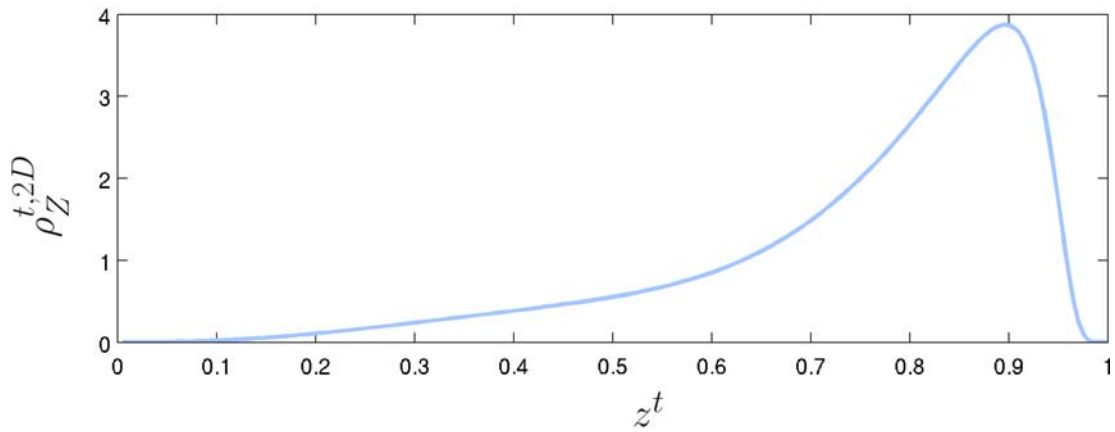


FIGURA 6.5: Escenario 4. Histograma normalizado de la v.a. $Z^e | (H = 6)$

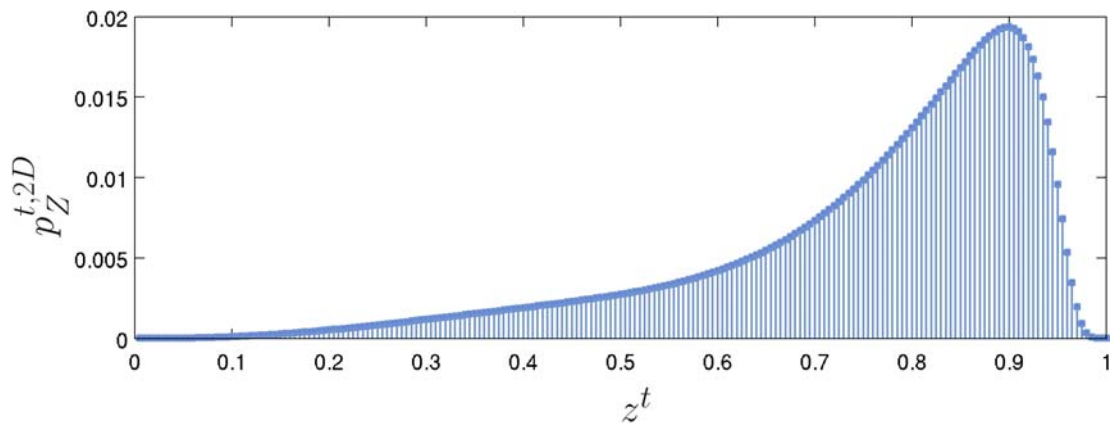
la v.a. Z^e es discreta, es más conveniente trabajar con la función de distribución de probabilidad o función de masa de probabilidad (PMF, *Probability Mass Function*). Puesto que el objetivo es comparar los datos experimentales frente a los datos teóricos, la comparación ha de realizarse en términos de funciones de masas de probabilidad en lugar de funciones de densidad de probabilidad. Para ello, en primer lugar, es preciso estimar la PMF equivalente p_Z^t a partir de la PDF teórica ρ_Z^t , integrando esta última por intervalos y atribuyendo los valores de probabilidad obtenidos a un punto de cada intervalo.

La función de distribución o función de densidad acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*) de una v.a. continua U se define como la probabilidad de que la variable U adquiera un valor igual o inferior a u : $F_U(u) = P(U \leq u) = \int_{-\infty}^u \rho_U(t)dt$.

Análogamente, la probabilidad de que el valor de la variable U esté contenido en un entorno ω_u es: $P(U \in \omega_u) = \int_{\omega_u} \rho_U(t)dt$ [79]. Por otra parte, la PMF de una v.a. discreta V es $p_V(v) = P(V = v)$ [80]. Si se atribuye un valor v a cada intervalo ω_u : $v \rightarrow \omega_u$, entonces: $p_V(v) = P(V = v) = P(U \in \omega_u) = \int_{\omega_u} \rho_U(t)dt$. Puesto que la elección del intervalo de integración no es trivial, se trata separadamente en la Sección 6.1.4. Debido a que sólo se dispone de valores numéricos y no de la expresión analítica, el método de integración para estimar la probabilidad de cada intervalo debe ser igualmente numérico. En este caso particular, el método empleado es el método de integración trapezoidal. En la Figura 6.6 se presenta la conversión de PDF a PMF para la curva correspondiente a $\xi/L = 0,56$ en el modelo de dos dimensiones. En la Figura 6.6(a) se muestra la $\rho_Z^{t,2D}$ mientras que la $p_Z^{t,2D}$ equivalente se presenta en la Figura 6.6(b).



(a)



(b)

FIGURA 6.6: (a) Función de densidad de probabilidad del modelo teórico de 2D para $\xi/L = 0,56$, $\rho_Z^{t,2D}$; (b) función de masa de probabilidad equivalente, $p_Z^{t,2D}$

Tras calcular las probabilidades asociadas al modelo teórico, es necesario obtener las probabilidades asociadas a la v.a. $Z^e|H$. Las Figuras 6.7 y 6.8 presentan las PMF

correspondientes a los histogramas mostrados en las Figuras 6.4 y 6.5, respectivamente.

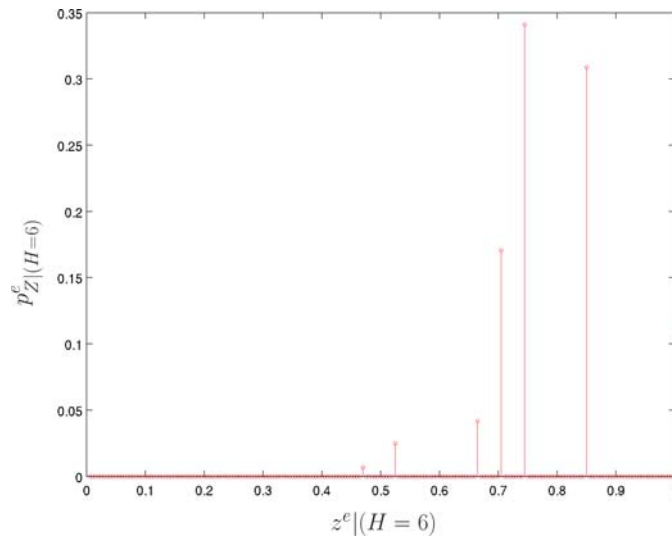


FIGURA 6.7: Escenario 1. Distribución de probabilidad de la v.a. $Z^e | (H = 6)$, $p_{Z^e | (H=6)}^e$

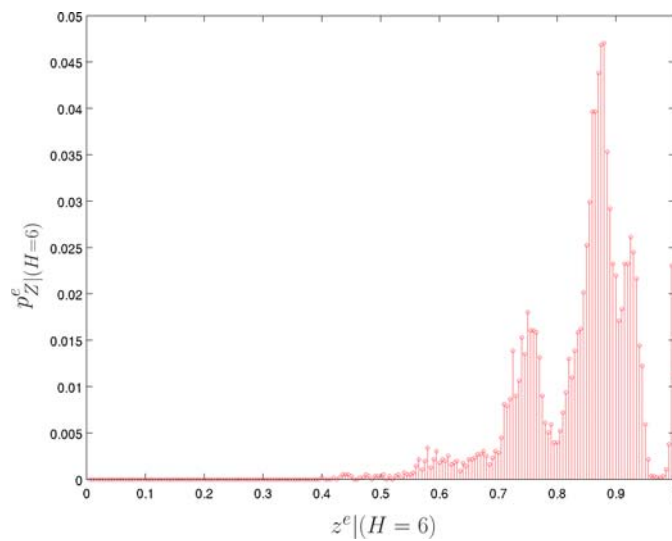


FIGURA 6.8: Escenario 4. Distribución de probabilidad de la v.a. $Z^e | (H = 6)$, $p_{Z^e | (H=6)}^e$

6.1.4. Elección del tamaño de los intervalos de integración

La elección de la longitud de los intervalos ω_z en los que se realiza la integración para convertir la PDF ρ_Z^t a su equivalente discreto p_Z^t no es arbitraria. Considérese el caso en el que los nodos no son perfectamente equidistantes y los valores de $Z^e | H$ cubren cómodamente el rango $(0, 1]$. En este caso, el intervalo de integración puede ser tan pequeño como el periodo de muestreo de Z^t . Así, cuando el intervalo de integración coincide con el periodo de muestreo considerado, 0.005, se obtiene la máxima resolución.

La Figura 6.9 presenta la PMF correspondiente al Escenario 4 para $H = 15$ saltos y un intervalo de integración de longitud 0.005. El modelo teórico empleado es el de 2D.

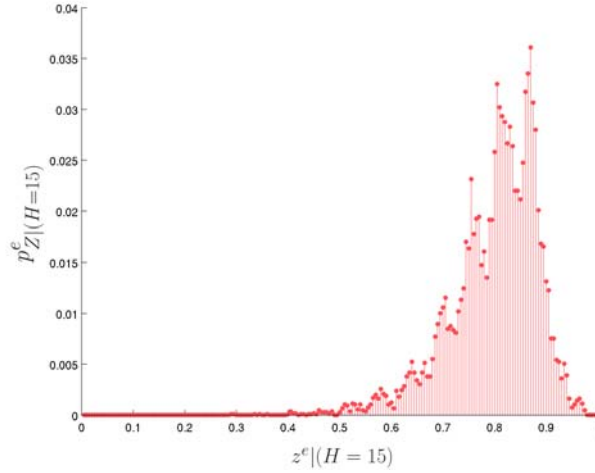


FIGURA 6.9: Escenario 4. Distribución de probabilidad con $H = 15$, $p^e_{Z|(H=15)}$ con resolución 100 %

Si, por el contrario, la red es perfectamente regular, el conjunto de valores de $Z^e|H$ es mucho más reducido que el de Z^t , que, recuérdese, es una v.a. continua. En consecuencia, las PMFs correspondientes no son comparables, ya que determinados valores de la v.a. $Z^e|H$ tendrán asociado un valor nulo de probabilidad que sería distinto de cero si se dispusiera de un mayor número de valores diferentes de $Z^e|H$. Para evitar este efecto se aumenta la longitud del intervalo de integración disminuyendo consecuentemente la resolución. Esta estrategia no significa en ningún caso eliminar información, ya que todas las probabilidades de $Z^e|H$ se acumulan sobre el valor de Z^t más próximo. La Figura 6.10 ilustra la problemática de la elección de la resolución en el caso de escenarios con nodos equidistantes. En ella se muestra la PMF correspondiente al Escenario 1 para $H = 15$, $p^e_{Z|(H=15)}$, tomando como referencia los valores Z^t correspondientes a $p_Z^{t,2D}$ para dos intervalos de integración diferentes. En la Figura 6.10(a), el intervalo de integración es de longitud 0.005, dando lugar a la resolución máxima y en la Figura 6.10(b), el intervalo de integración es de longitud 0.03, lo que se traduce en una resolución del 16.67 %.

6.1.5. Criterio de comparación de las distribuciones teórica y experimental

Como ya se avanzó, el objetivo es comparar unos resultados teóricos, obtenidos a partir del muestreo uniforme de la PDF teórica, con los datos obtenidos experimentalmente, esto es, los valores de R/L agrupados en función del número de saltos. Para ello se acude

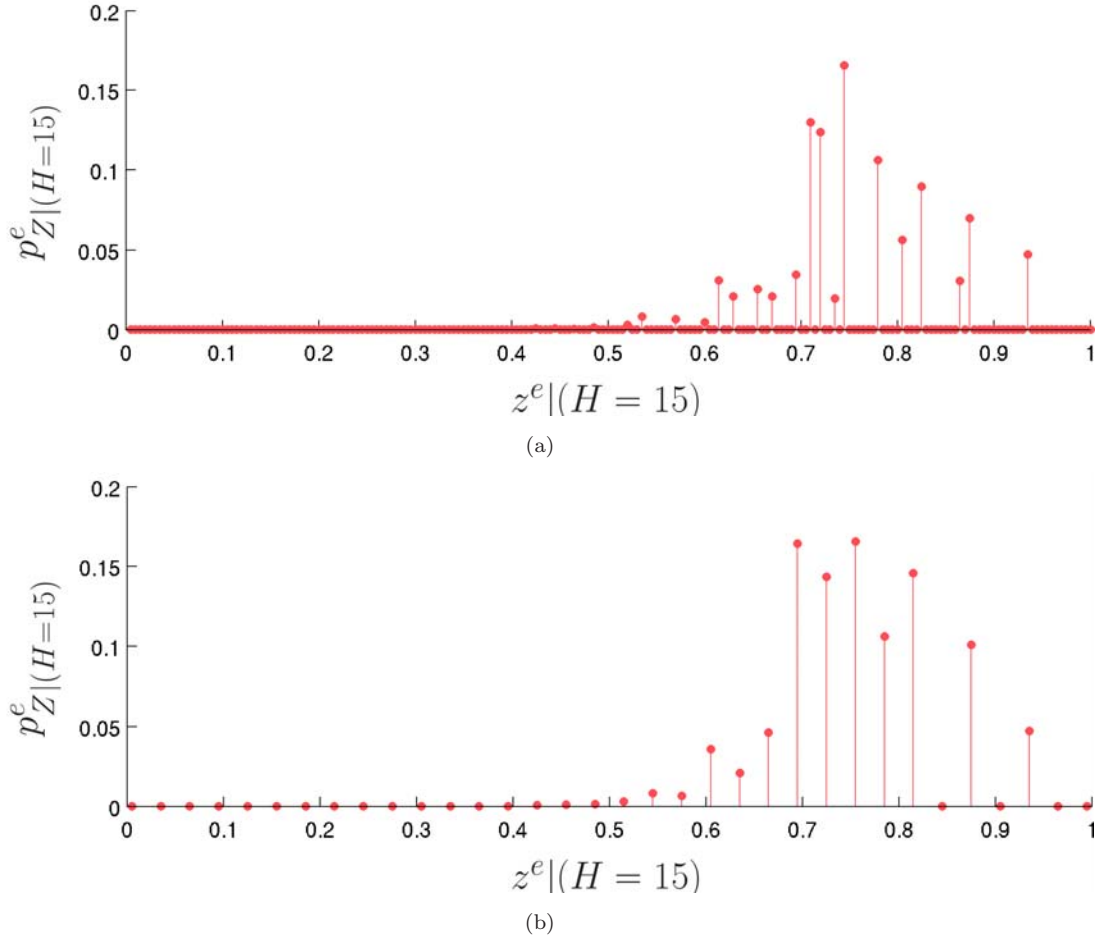


FIGURA 6.10: Escenario 1. Distribución de probabilidad $p_{Z|H=15}^e$ (a) con resolución 100%; (b) con resolución 16.67%

al concepto de entropía relativa o divergencia de Kullback-Leibler (DKL). La DKL entre dos funciones de densidad de probabilidad f y g , se define como $D(f||g) = \int f \log \frac{f}{g}$ [81, 82]. Nótese que el valor de $D(f||g)$ sólo es finito cuando el conjunto de f está contenido en el conjunto de valores en los que $g > 0$. La DKL, aplicada a dos funciones de masa de probabilidad, f' y g' , se expresa como un sumatorio donde cada sumando se refiere a los valores de las PMFs: $D[f'||g'] = \sum f' \log \frac{f'}{g'}$. Si se hace corresponder f' con $p_{Z|H}^e$ y g' con p_Z^t , la expresión resultante es:

$$D[p_{Z|H}^e || p_Z^t] = \sum p_{Z|H}^e \log \frac{p_{Z|H}^e}{p_Z^t} \quad (6.1)$$

Puesto que la DKL es una medida de semejanza entre PDFs o PMFs, encontrar la distribución teórica que mejor se ajuste a la experimental se convierte en un problema de minimización, siendo la solución óptima aquella que proporcione una DKL mínima. Para cada uno de los dos modelos teóricos y cada valor de H , se calcula la DKL entre $p_{Z|H}^e$ y las diferentes $p_Z^{t,2D}$ y $p_Z^{t,3D}$ caracterizadas por un valor de ξ/L . Aquél valor de ξ/L

para el cual se obtiene la mínima divergencia se convierte en el valor óptimo $\xi/L_{\text{óptimo}}$ para el modelo teórico y el número de saltos considerados:

$$\xi/L_{\text{óptimo}} = \xi/L / \min\{D[p_{Z|H}^e \parallel p_Z^t]\} \quad (6.2)$$

Aquella PMF caracterizada por un valor de $\xi/L = \xi/L_{\text{óptimo}}$ será la PMF óptima (de entre las disponibles) para un escenario y un número de saltos dado.

La Figura 6.11 muestra la evolución del valor de la DKL en función de ξ/L para el Escenario 4 con $H = 17$ y para los modelos teóricos de 2D y 3D. Para visualizar mejor la diferencia entre las dos curvas, el valor de DKL se expresa en unidades logarítmicas. Para el modelo de 2D, el valor mínimo de divergencia es $10\log_{10}(DKL) = 0,1439$, para $\xi/L = 0,53$ y para el modelo de 3D, el valor de divergencia mínimo es $10\log_{10}(DKL) = -12,7$, para $\xi/L = 0,61$.

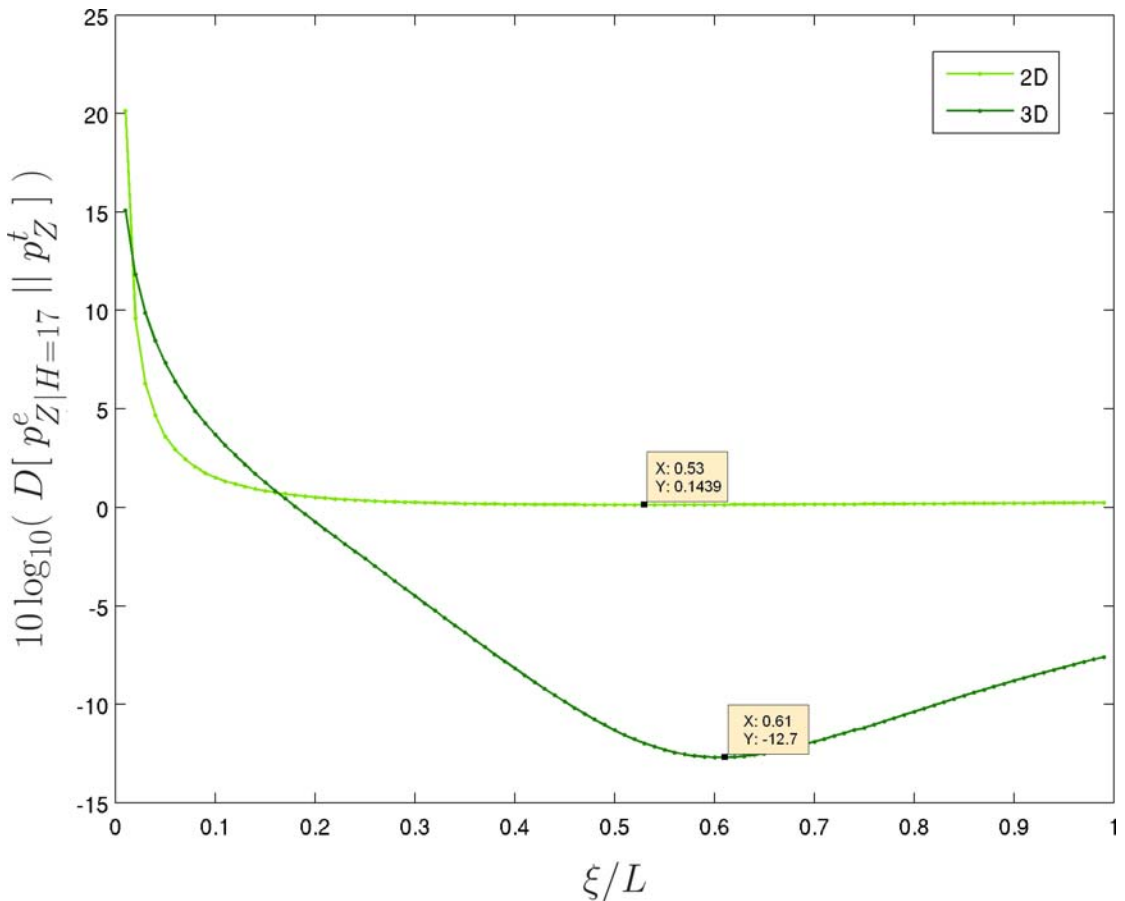


FIGURA 6.11: Escenario 4. Evolución del valor de $10\log_{10}(DKL)$ en función del valor de ξ/L de $p_{Z|(H=17)}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ y de $p_{Z|(H=17)}^e$ y $p_Z^{t,3D}$

Cada $p_{Z|H}^e$ se compara con cada una de las $p_Z^{t,2D}$ y con cada una de las $p_Z^{t,3D}$. Se dice que $p_{Z|H}^e$ se ajusta a unos de los modelos cuando, la mínima DKL entre $p_{Z|H}^e$ y p_Z^t de ese

modelo es menor que la mínima DKL entre $p_{Z|H}^e$ y p_Z^t del otro modelo para un número de saltos dado. Con respecto a la Figura 6.11, el mínimo valor de la divergencia para el modelo de 3D tiene un valor inferior al de la mínima divergencia para el modelo de 2D. Por tanto, $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,61$ para el Escenario 4 y con un número de saltos $H = 17$, ajustándose en este caso al modelo de 3D.

Otro método equivalente a la DKL es el producto escalar (PE), similar a la correlación entre dos PDFs o dos PMFs. El PE entre $p_{Z|H}^e$ y p_Z^t se expresa como un sumatorio donde cada sumando se refiere a los valores de las PMFs:

$$\langle p_{Z|H}^e, p_Z^t \rangle = \sum p_{Z|H}^e \cdot p_Z^t \quad (6.3)$$

El PE es una medida de similitud, por lo que la comparación se transforma ahora en un problema de maximización. De manera equivalente, el valor óptimo

$\xi/L_{\text{óptimo}}$ es el valor de ξ/L para el cual se obtiene el máximo valor de PE:

$$\xi/L_{\text{óptimo}} = \xi/L / \max\{\langle p_{Z|H}^e, p_Z^t \rangle\} \quad (6.4)$$

Como se demuestra a continuación, ambos criterios, DKL y PE, son equivalentes, dando lugar a soluciones de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ idénticas, ya que el logaritmo es una función monótona creciente y no afecta a la solución de un problema de maximización o de minimización [83]:

$$\begin{aligned} \xi/L / \min\{D[p_{Z|H}^e || p_Z^t]\} &= \xi/L / \min\left\{\sum p_{Z|H}^e \log \frac{p_{Z|H}^e}{p_Z^t}\right\} \\ &= \xi/L / \min\left\{\sum p_{Z|H}^e (\log p_{Z|H}^e - \log p_Z^t)\right\} \\ &= \xi/L / \min\left\{\sum p_{Z|H}^e \cdot \log p_{Z|H}^e - p_{Z|H}^e \cdot \log p_Z^t\right\} \\ &= \xi/L / \min\left\{\sum -p_{Z|H}^e \cdot \log p_Z^t\right\} \\ &= \xi/L / \max\left\{\sum p_{Z|H}^e \cdot \log p_Z^t\right\} \\ &= \xi/L / \max\{\langle p_{Z|H}^e, p_Z^t \rangle\} \end{aligned} \quad (6.5)$$

La Figura 6.12 muestra la evolución de la DKL en función de ξ/L para la PMF teórica de 2D con la PMF experimental del Escenario 3 para diferentes valores del número de saltos. Obsérvese que el valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ disminuye a medida que aumenta el número de saltos.

Por su parte, la Figura 6.13 muestra la evolución del PE en las mismas circunstancias que las de la Figura 6.12. Como se puede apreciar, la tendencia de la DKL y del PE es

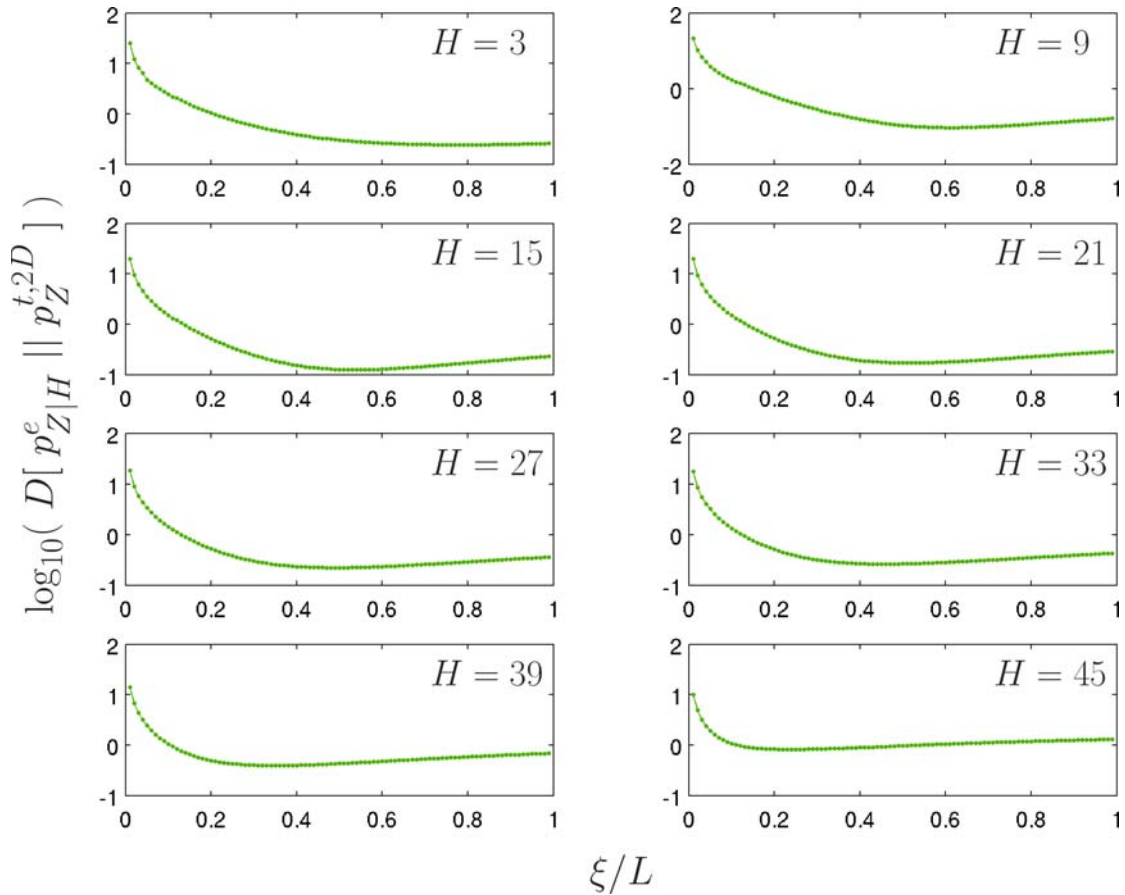


FIGURA 6.12: Escenario 3. Evolución de la divergencia entre $p_{Z|H}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ en función de ξ/L de $p_{Z|H}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ con $H = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45$

la análoga para el mismo modelo teórico y el mismo escenario a través de los diferentes valores de H .

6.1.6. Limitaciones de los modelos teóricos en espacio continuo

En un modelo de espacio continuo, la probabilidad de que la v.a. U continua tome un valor u es nulo, esto es, $P(U = u) = 0$, y por tanto no es posible establecer una ruta óptima ($R/L = 1$). En estos modelos, se considera que el número de nodos de la red es infinito, de tal forma que existirán múltiples caminos en los que $R/L \rightarrow 1$, pero ninguno de ellos será el óptimo. La Figura 6.14 ilustra esta reflexión. Considérese un elipsoide de revolución cuyo eje menor tiene una longitud que tiende a cero. Dentro de él están circuscritos todos los caminos con $R/L \rightarrow 1$, pero debido a que el número de rutas contenidas en el volumen es infinito, la probabilidad de que exista un camino con $R/L = 1$ es cero.

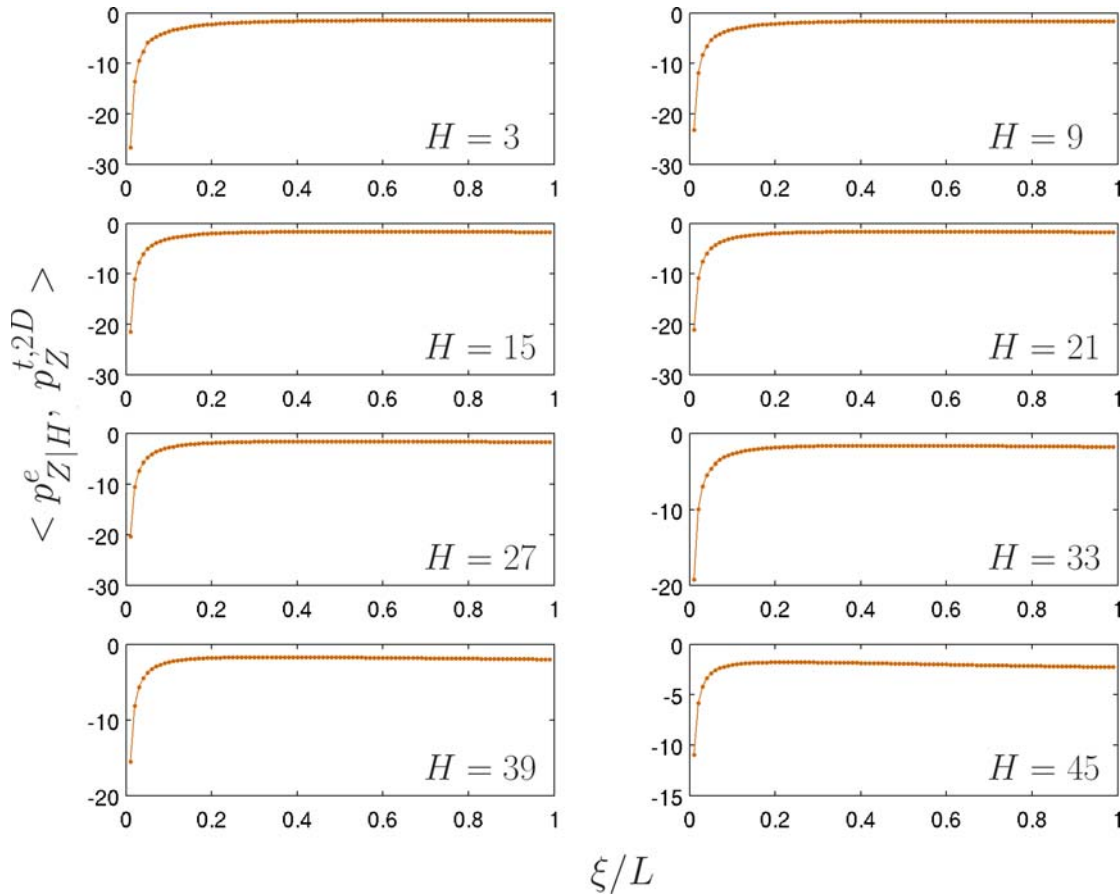


FIGURA 6.13: Escenario 3. Evolución del producto escalar entre $p_{Z|H}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ en función de ξ/L con $H = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45$

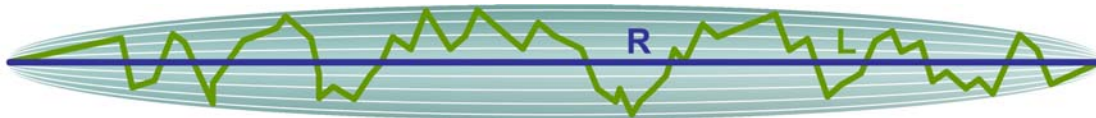


FIGURA 6.14: Modelo continuo en el que $P_Z(Z = 1) = 0$. La ruta L representa uno de los infinitos caminos que se pueden trazar dentro del elipsoide de revolución con $R/L \approx 1$

Por el contrario, en un modelo discreto y con un número de saltos reducido ($H = 2, 3, \dots$), la probabilidad de obtener una ruta óptima es alta. La DKL es un sumatorio en el que cada contribución se calcula para todos y cada uno de los valores de $z^t \in [0,005, 1]$. Cuando $z = 1$, en el modelo teórico se tiene $P_Z^t = 0$ mientras que en los datos empíricos $P_{Z|H}^e > 0$, por lo que los valores de la divergencia aumentan drásticamente cuando $z \approx 1$. Este efecto es indeseable, puesto que conduce a elegir como mejor modelo, 2D o 3D, aquél que, casualmente, produzca un menor valor de divergencia. La Figura 6.15 muestra este efecto para el Escenario 4 con $H = 3$. En el eje de abscisas se tienen los valores de z y en el de ordenadas, el valor correspondiente de la DKL acumulada entre la PMF teórica y la experimental. En la gráfica se representan dos curvas: una modela el valor de la

DKL con el modelo de 2D y la otra con el modelo de 3D. Obsérvese que las curvas se cruzan cuando $DKL = 0,1869$ para $z = 0,9903$. Esto significa que la DKL acumulada es menor para el modelo de 3D hasta un valor de $z = 0,9903$, a partir del cual aumenta considerablemente para los dos modelos, ocasionando que la DKL acumulada sea menor para el modelo de 2D. A partir de esta observación se establece que para los valores a partir de los cuales se produce un *efecto de repunte*, en este caso, $z > z_{max} = 0,9903$, la solución obtenida mediante la minimización de la DKL deja de ser fiable.

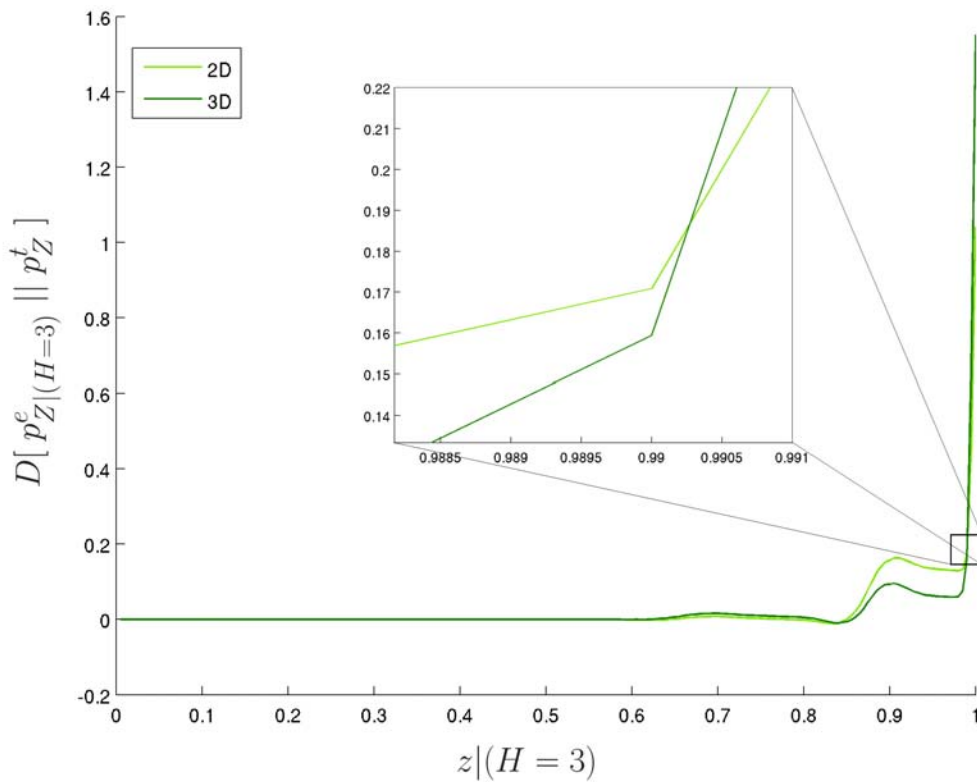


FIGURA 6.15: Escenario 4. Evolución del valor de la DKL en función de z de $p_{Z|(H=3)}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ y de $p_{Z|(H=3)}^e$ y $p_Z^{t,3D}$ con ocho valores de saltos. Se aprecia que el valor $z_{max} = 0,9903$ para una $DKL = 0,1869$

La Figura 6.16 ilustra cómo la solución computacional se falsea en el caso del Escenario 4 con $H = 3$. En la Figura 6.16(a) se muestra la superposición de la $p_{Z|(H=3)}^e$ con la $p_Z^{t,2D}$ óptima y en la Figura 6.16(b) se presenta la superposición de la $p_{Z|(H=3)}^e$ con la $p_Z^{t,3D}$ óptima. Visualmente se aprecia que el mejor ajuste se produce para el modelo de 3D, ya que la moda de la PMF teórica para este modelo y la moda de la PMF experimental en la región $0,8 < z < 0,95$ son más próximas. Sin embargo, debido al efecto comentado en la Figura 6.15, el cálculo numérico de la DKL establece que el modelo que más se ajusta es el de 2D.

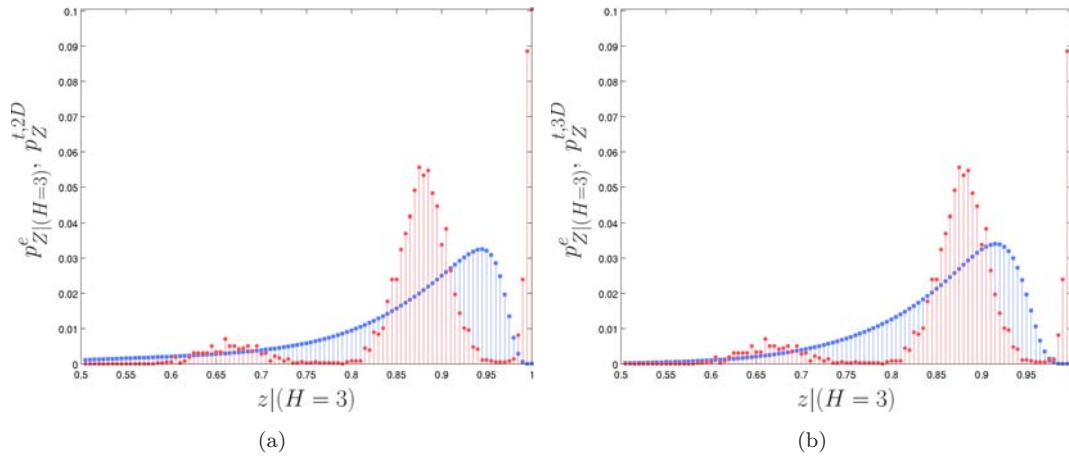


FIGURA 6.16: Escenario 4. (a) Comparación de $p_{Z|(H=3)}^e$ (rojo) frente a $p_Z^{t,2D}$ (azul) en función de z ; (b) comparación de $p_{Z|(H=3)}^e$ (rojo) frente a $p_Z^{t,3D}$ (azul) en función de z

Generalmente, el valor de z_{max} en el que se cruzan los valores de la DKL es estrictamente creciente con el número de saltos, de tal modo que existe un número de saltos en el que $z_{max} = 1$ y este efecto deja de producirse. Por ejemplo, para el Escenario 1, el *efecto de repunte* desaparece para $H \geq 15$ y en el caso del Escenario 3 y 4, este efecto deja de producirse cuando $H \geq 7$. El caso del Escenario 2 merece un tratamiento aparte: aunque el *efecto de repunte* desaparece igualmente para $H \geq 8$, el valor de z_{max} no es estrictamente creciente según H . Con el fin de evitar esta anomalía, se hace necesario despreciar los valores que cumplen $z_{max}^t = z^t > z_{max}$ para cada escenario, teniendo en cuenta que z_{max} es un número real y z^t pertenece a un conjunto discreto de valores múltiplos de 0.005. Sin embargo, puesto que esta eventualidad se produce para valores de saltos reducidos, es preciso establecer también un valor H_{min} . Este valor se fija a $H_{min} = 3$, con el fin de estudiar separadamente el caso de $H = 2$. Así, para el Escenario 1, se tiene que $z_{max}^t = 0,995$, y para el Escenario 3 y el Escenario 4 se obtiene $z_{max}^t = 0,99$. Por su parte, para el Escenario 2 se tiene la siguiente evolución: $z_{max}^t = 0,995, 0,995, 0,95, 0,955, 0,965, 0,995$ para valores desde $H = 2$ hasta $H = 7$ respectivamente.

El caso de $H = 2$ se exhibe en la Figura 6.17, que muestra para el Escenario 2 el efecto causado por la elección de $z > z_{max}$. En la PMF mostrada en la Figura 6.17(a), se considera $z_{max} = 1$, dando lugar a $P(Z = 0,705) = 0,1814$, $P(Z = 0,925) = 0,5002$ y $P(Z = 1) = 0,3184$. En la PMF presentada en la Figura 6.17(b), se toma $z_{max} = 0,995$ (se desprecia el último punto, $z = 1$), por lo que, $P(Z = 0,705) = 0,2661$ y $P(Z = 0,925) = 0,7339$. Este cambio en los valores de probabilidad al eliminar el punto correspondiente a $z = 1$ hace que la probabilidad se distribuya entre los otros dos valores, mermando así la significatividad estadística.

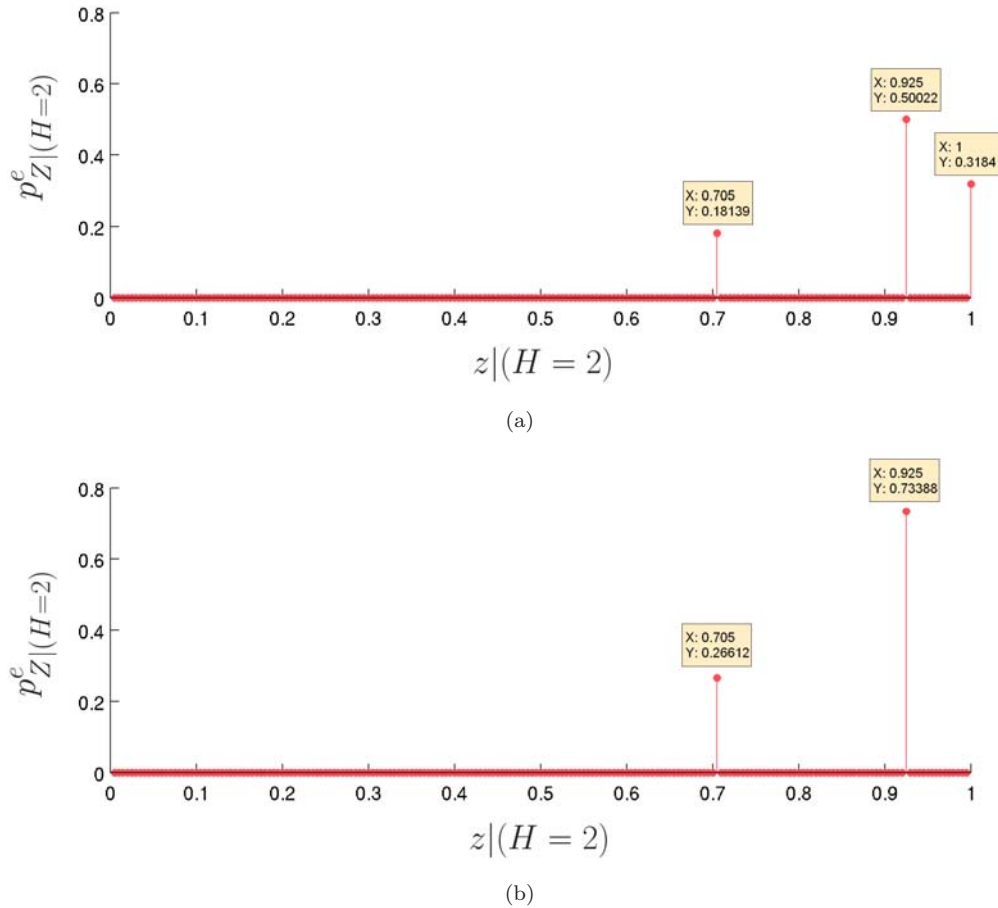


FIGURA 6.17: Escenario 2. (a) $p_{Z^e|H=2}^e$ para $Z^e|H=2 \in (0, 1]$; (b) $p_{Z^e|H=2}^e$ para $Z^e|H=2 \in (0, 0.995]$

Los valores que aparecen en la Figura 6.17 son justificables gráficamente. Como se comentó en la Sección 5.2.1, A_H es el número de caminos posibles desde un nodo origen para alcanzar cualquier nodo destino en un número de saltos H . En primer lugar, en un escenario cuadrado con alcance a un vecino y para $H = 2$, se tienen 8 destinos potenciales y $A_2 = 12$ rutas posibles. En el caso de un escenario cuadrado con alcance a dos vecinos estos números se incrementan exponencialmente, con 24 destinos potenciales y $A_2 = 32$ caminos posibles. La Figura 6.18 muestra estas 32 combinaciones divididas en cuatro grupos atendiendo a la geometría de las rutas. Como $H = 2$ y hay dos longitudes de saltos, d_{1v} y d_{2v} , se tienen cuatro tipos posibles de caminos, siendo simétricos los caminos dentro de cada grupo. En la Figura 6.18(a) se muestran los ocho caminos formados por dos saltos perpendiculares a primeros vecinos; en la Figura 6.18(b), los ocho caminos compuestos por un salto a segundos vecinos y por un salto a primeros vecinos; en la Figura 6.18(c), los ocho caminos compuestos por un salto a primeros vecinos y por un salto a segundos vecinos, complementarios a los anteriores; y en la Figura 6.18(d), los ocho caminos formados por dos saltos a primeros vecinos en la misma dirección y sentido. Puesto que se trata de una topología cuadrada regular, $d_{1v} = d$ y $d_{2v} = \sqrt{2}d$.

- La primera figura presenta la evolución del valor mínimo de la divergencia en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D, con el fin de determinar qué modelo analítico (2D o 3D) se ajusta mejor a los resultados experimentales. Esto se traduce en representar la evolución de la DKL para $p_{Z|H}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ y la evolución de la DKL para $p_{Z|H}^e$ y $p_Z^{t,2D}$ simultáneamente.
- En la segunda figura se ofrece la PMF experimental condicionada al número de saltos frente a la PMF del modelo analítico determinando a partir de la primera figura para diferentes valores del número de saltos.
- La tercera figura muestra una representación tridimensional de la PDF del modelo teórico que mejor se ajusta a los resultados experimentales para todos los valores de H .
- Para concluir, en la cuarta figura se representa la progresión del valor de ξ/L con el número de saltos, con el propósito de analizar la evolución de la directividad de cada escenario.

A continuación se presentan los comentarios asociados a cada uno de los tipos de figuras para cada uno de los escenarios simulados. El procedimiento seguido en esta sección ha consistido en examinar cada tipo de gráfica para cada escenario, con el fin de subrayar las particularidades de cada escenario con respecto al resto.

6.2.1. Análisis de los resultados para el Escenario 1

Este escenario está compuesto por 1089 nodos perfectamente equidistantes. El valor de potencia elegido y la distancia entre nodos adyacentes da lugar a que la cobertura sea sólo para primeros vecinos. En primer lugar se presenta este escenario, puesto que las características de red con topología cuadrada y fija dan lugar a una marcada estructura en los resultados, siendo así más inmediata la extracción de conclusiones.

La Figura 6.19, muestra el valor mínimo de la DKL en función de H para los modelos de 2D y 3D en el Escenario 1. Como ya se ha comentado, la DKL es una medida de desemejanza, por lo que se tiene un problema de minimización en el que se trata de determinar qué $p_Z^{t,2D}$ y qué $p_Z^{t,3D}$ presenta la menor divergencia con cada $p_{Z|H}^e$, esto es, qué curva teórica de cada modelo describe mejor el comportamiento de cada distribución experimental de R/L dado un número de saltos H . Como se puede apreciar en dicha figura, los valores de la DKL tanto para 2D como para 3D, son más altos para los primeros y últimos valores del número de saltos, lo que implica que existe menos semejanza entre las PMF teóricas y la PMF experimental para esos valores extremos

H , especialmente cuando el número de saltos es reducido. Esto se debe a que se tiene poca representatividad estadística para los valores muy reducidos y muy elevados de H , como se puede comprobar a la vista de la Figura 6.3. Los valores máximos de la DKL coinciden en 2D y 3D para $H = 3$, lo que señala que la $p_Z^{t,2D}$ y la $p_Z^{t,3D}$, caracterizadas por sus correspondientes valores de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ elegidos para $H = 3$, son las menos semejantes a $p_{Z|H}^e$ en comparación con el resto de saltos. Por el contrario, los valores más bajos de la DKL se dan en los valores centrales de H , lo que revela que las PMFs teóricas elegidas en estos valores intermedios de H modelan mejor las PMFs experimentales correspondientes. En ambos modelos, el mínimo se obtiene para $H = 18$, por lo que las p_Z^t seleccionadas para ese número de saltos son las más similares a $p_{Z|H}^e$. En la primera mitad de los valores de H , la tendencia de los valores de la DKL es decreciente, lo que revela que los valores de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ elegidos a lo largo del número de saltos origina que las p_Z^t sean cada vez más similares a $p_{Z|H}^e$. Por el contrario, en la segunda mitad, la tendencia de la DKL es creciente, lo que sugiere que a partir de aproximadamente 21 saltos, las p_Z^t se ajustan peor a la $p_{Z|H}^e$ correspondiente. También se observa que las curvas son considerablemente paralelas, por lo que el patrón de evolución es similar para ambos modelos. Esto sugiere que los valores elegidos para $\xi/L_{\text{óptimo}}$ a lo largo del número de saltos en el modelo de 2D son parejos a los elegidos para el modelo de 3D. El pequeño desplazamiento entre las dos curvas indica que la semejanza de la p_Z^t del modelo de 2D con la $p_{Z|H}^e$ y la semejanza de la p_Z^t del modelo de 3D con la $p_{Z|H}^e$ tienen magnitudes similares a través del número de saltos. Es de especial relevancia destacar que para todos los valores de H , el valor de la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,3D}$ es menor al valor de la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,2D}$. Por tanto, se afirma que, globalmente, el mejor ajuste para este escenario se produce con el modelo de 3D.

Puesto que el mejor ajuste para todos los valores de H se produce para el modelo de 3D, la Figura 6.20 presenta, para el Escenario 1, las PMFs experimentales condicionadas al número de saltos, $p_{Z|H}^e$, frente a la evolución de la PMF óptima $p_Z^{t,3D}$ sobre el mismo eje z . Con el fin de apreciar la evolución según se incrementa la longitud de una ruta, se contemplan ocho valores diferentes del número de saltos H . Nótese que el valor del eje de ordenadas para $H = 3$ alcanza el valor unitario, siendo la mitad para el resto de gráficas. La longitud del intervalo de integración para la transformación de la PDF teórica a su equivalente discreto PMF es de 0.03, lo que da lugar a una resolución de 16.67%. Las muestras están considerablemente separadas, debido a que ésta es la mínima resolución considerada para todos los escenarios, ya que aquí el espacio muestral de $Z^e|H$ es muy reducido: para este escenario se cuenta con 1112 valores diferentes del cociente $Z^e|H$, mientras que para el Escenario 4, se dispone de 168199 valores diferentes. El máximo valor de z considerado es $z_{max} = 0,995$, para evitar el *efecto de repunte* en valores próximos a $z = 1$. La forma de la curva de 3D mostrada en la Figura 6.19 refleja que las

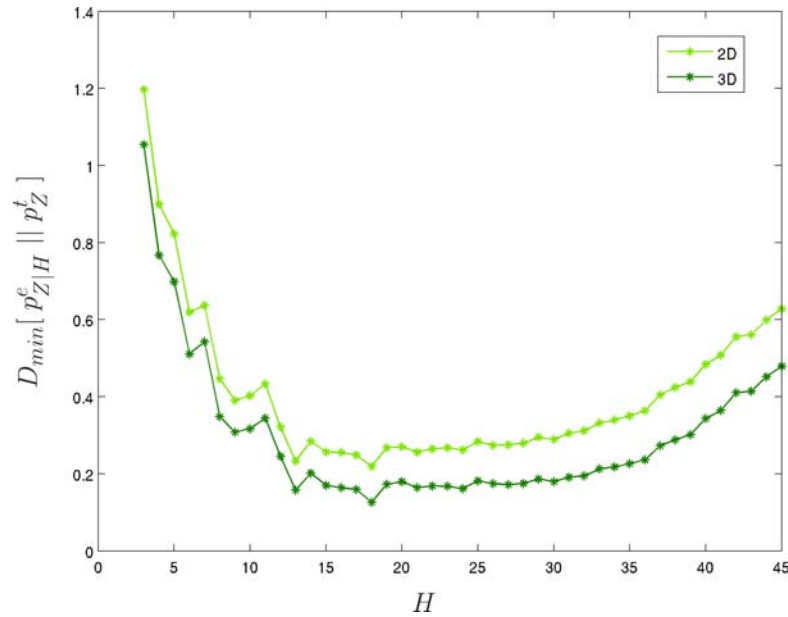


FIGURA 6.19: Escenario 1. Evolución de la DKL mínima, $D_{min}[p_{Z|H}^e || p_Z^t]$, en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

siete $p_Z^{t,3D}$ caracterizadas por sus valores correspondientes de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ más similares a sus correspondientes $p_{Z|H}^e$ son las que se tienen para los valores de los saltos $H = 13$, $H = 16$, $H = 17$, $H = 18$, $H = 21$ y $H = 24$. Por tanto, del conjunto de los ocho ajustes mostrados aquí, la PMF teórica más parecida a su correspondiente PMF experimental es la relativa a $H = 21$. Cabe señalar el caso particular de $H = 3$, ya que la única probabilidad no nula se tiene en $z = 0,755$. Esto se debe al efecto detallado en la Sección 6.1.6. Con cobertura a un sólo vecino, existen 36 caminos diferentes. Sólo 4 de ellos son óptimos, otros 28 tienen $R/L = \sqrt{5}/3 = 0,7454$, y los restantes, de $R/L = 1/3$, nunca se producen. Estos últimos caminos están compuestos por un salto en dirección vertical u horizontal, un salto en la otra dirección, y un salto en la misma dirección que el primer salto pero de sentido opuesto. Puesto que describen una ruta de $H = 3$ que puede realizarse en un solo salto, estos caminos nunca se presentan. En efecto, si se elimina el último punto $z = z_{max} = 1$, sólo existe un único valor diferente no nulo $z = 0,755$ al que se atribuye toda la probabilidad.

La Figura 6.21 muestra la evolución de las PMF teóricas óptimas del modelo de 3D en función de z y de H para el Escenario 1. Lo que aquí se representa son las diferentes formas que toma $p_Z^{t,3D}$ según el número de saltos y, puesto que una p_Z^t se modela según el parámetro ξ/L , lo que se pone de manifiesto es la evolución de este parámetro a través del número de saltos para modelar lo más fielmente posible su correspondiente $p_{Z|H}^e$. Las zonas elevadas indican mayores probabilidades de tener ese valor de z para un número de saltos dado. Las curvas de nivel muestran altos valores de probabilidad entre $z = 0,8$ y $z = 0,9$ a lo largo de un amplio rango de número de saltos, desde $H = 5$ hasta $H = 30$,

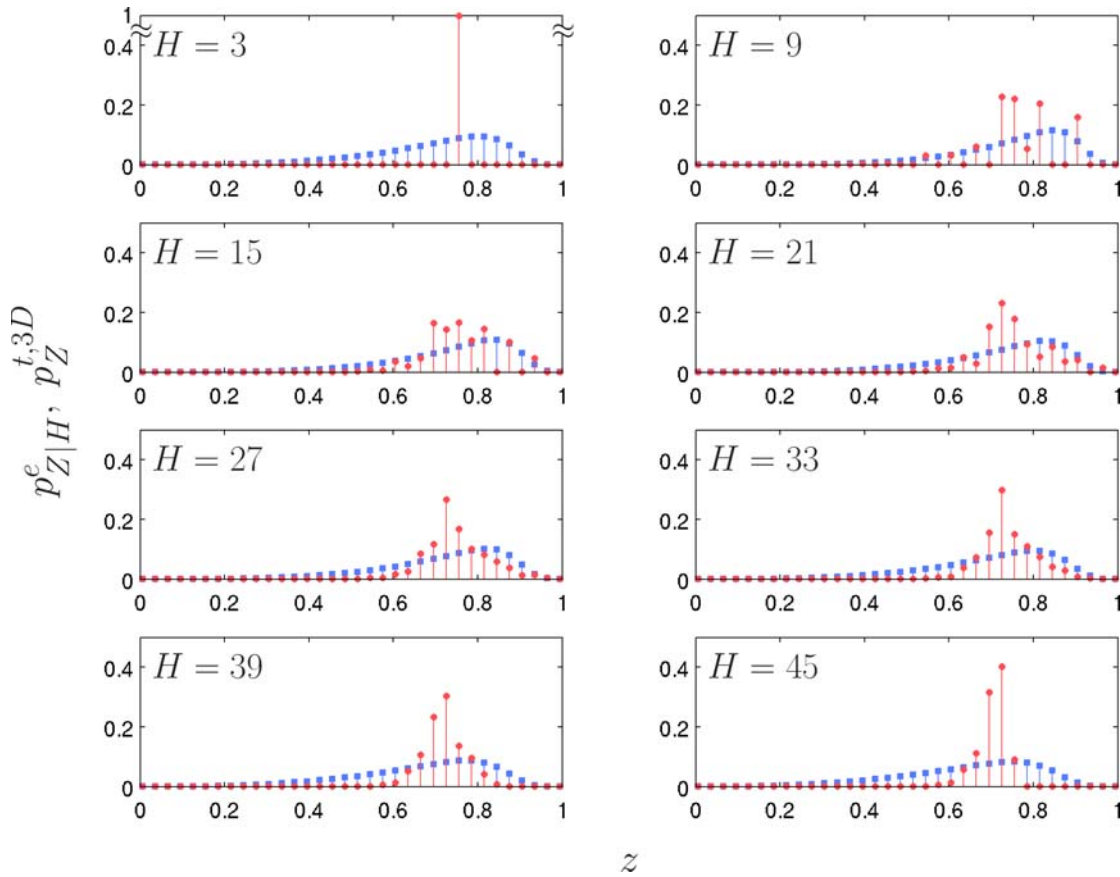


FIGURA 6.20: Escenario 1. Comparación de $p_{Z|H}^e$ (rojo) frente a $p_Z^{t,3D}$ (azul) en función de z con $H = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45$

lo que se traduce en un buen grado de eficiencia. Estas probabilidades son levemente mayores cuanto menor es H ya que, como es de esperar, las rutas más cortas son más eficientes que las de un número de saltos elevado.

Con el fin de evaluar la directividad en un escenario de topología cuadrada con alcance a primeros vecinos, en la Figura 6.22 se presenta la evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función del número de saltos. Para el modelo de 3D, que es el modelo que proporciona un mejor ajuste, la mayor directividad, correspondiente a $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,5$ se tiene para $H = 9, 12, 13$. La mayor directividad no se consigue para los números de saltos más bajos. La justificación de este fenómeno reside en el hecho de que en una red cuadrada con alcance a primeros vecinos, la trayectoria de un paquete sólo puede seguir direcciones verticales u horizontales. Con el fin de explicar gráficamente esta idea, en la Figura 6.23 se muestran dos casos en los que el nodo destino no está alineado vertical u horizontalmente con el nodo origen y es necesario efectuar un salto en vertical y uno o varios saltos en horizontal. Considérese una ruta con un número de saltos reducido. Para $H = 2$, si el primer salto es vertical, el siguiente ha de ser en horizontal. En este caso, $R = \sqrt{2}d$, $L = 2d$ y por tanto, $R/L = 1/\sqrt{2} = 0,7071$. Por el contrario, si el número de

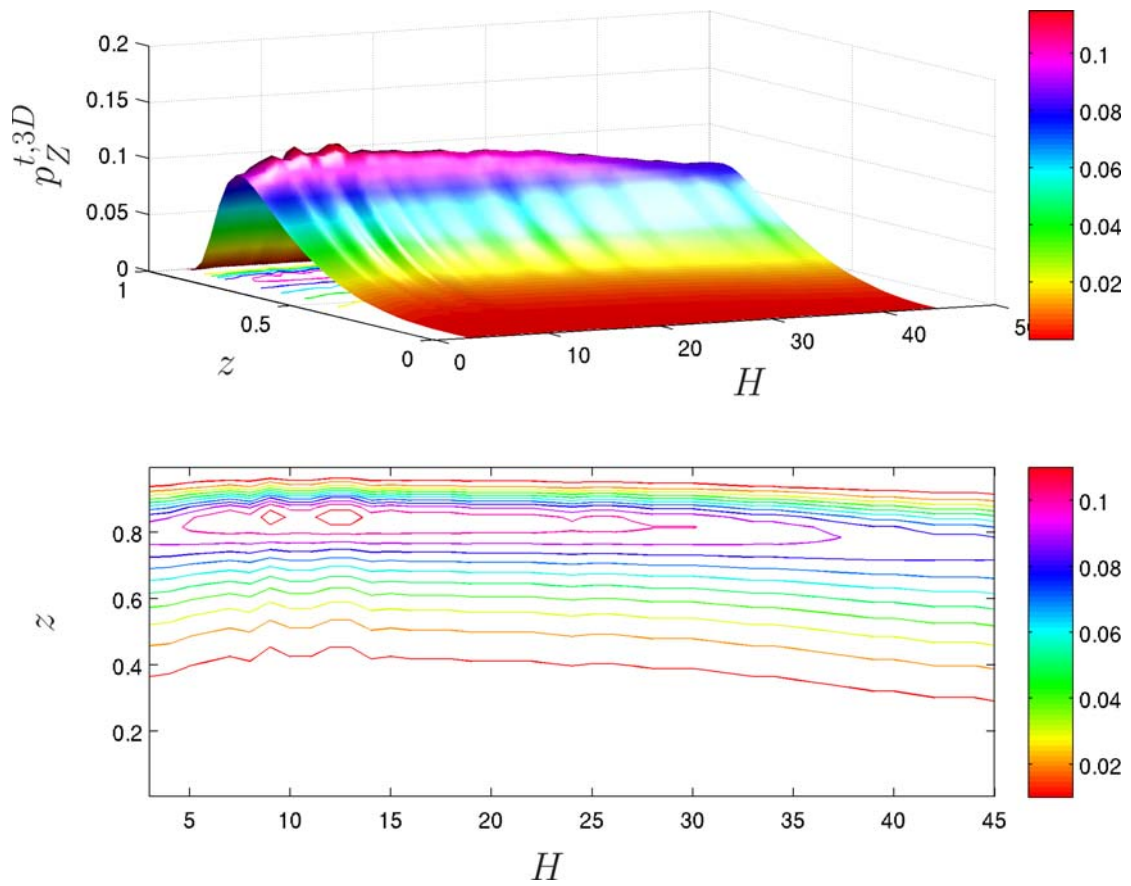


FIGURA 6.21: Escenario 1. Representación tridimensional de la $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z

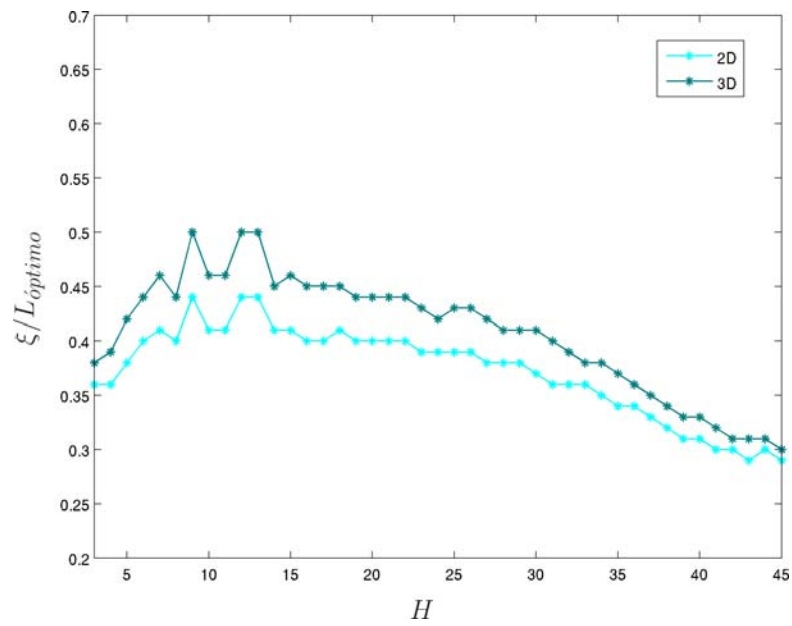


FIGURA 6.22: Escenario 1. Evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

saltos es elevado, póngase como ejemplo $H = 9$, el primer salto es en vertical pero los ocho restantes son en horizontal. Ahora, la eficiencia de la ruta se incrementa, ya que $R = \sqrt{65}d$, $L = 9d$ y en consecuencia, $R/L = \sqrt{65}/9 = 0,8958$.

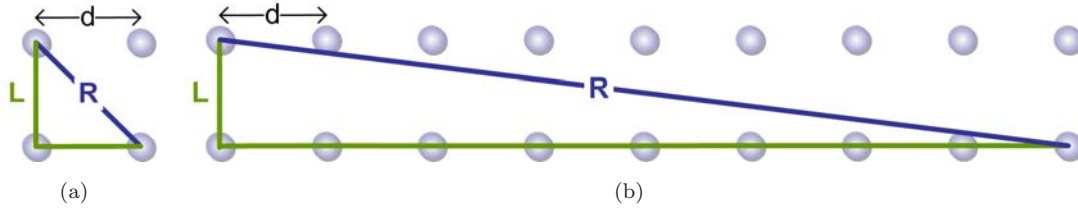


FIGURA 6.23: Escenario 1. Representación gráfica para justificar la eficiencia (a) con $H = 2$; (b) con $H = 9$

Retomando los comentarios para la Figura 6.22, para un número de saltos reducido, la tendencia es creciente, comenzando con $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,38$ para $H = 3$. El valor máximo es $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,5$ para $H = 9, 12, 13$ y el valor mínimo es $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,3$ para $H = 45$. El rango de variación de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ es muy reducido, ya que sólo hay una diferencia de 0,2 entre los valores máximo y mínimo. La justificación se encuentra en que este escenario se caracteriza por tener una estructura muy rígida, debido al reducido grado de conectividad de los nodos. Generalmente, las curvas correspondientes a 2D y 3D, están más próximas en los últimos valores de H , lo que implica que la directividad conseguida con el modelo de 2D no es notablemente peor que la conseguida con el modelo de 3D.

6.2.2. Análisis de los resultados para el Escenario 2

Este escenario sólo se diferencia del anterior en el rango de alcance. En el Escenario 2, la distancia entre nodos adyacentes disminuye en 20m respecto a la distancia entre nodos vecinos para el Escenario 1. Al mantener la potencia de transmisión, se amplía la cobertura al doble de nodos (primeros y segundos vecinos). Cabe esperar por esta circunstancia que la eficiencia del protocolo será mayor aquí, ya que un nodo es ahora capaz de alcanzar al doble de nodos en un sólo salto.

La progresión del valor mínimo de la DKL en función de H para 2D y 3D en el Escenario 2 se ofrece en la Figura 6.24. En comparación con la Figura 6.19, aquí los valores de la DKL son siempre más bajos para cada valor de H , lo que manifiesta que los modelos teóricos $p_Z^{t,2D}$ y $p_Z^{t,3D}$ se adaptan mejor a los datos empíricos, $p_{Z|H}^e$. Este hecho se aprecia especialmente desde el mínimo número de saltos hasta, aproximadamente, $H = 10$, donde se aprecia una caída abrupta en los valores de la DKL. Para 3D, el mínimo se produce en $H = 14$, lo que indica que las p_Z^t en este valor de H son las que mejor modelan la $p_{Z|H}^e$ para los números de saltos considerados. Para concluir, es

necesario enfatizar que, al igual que en el Escenario 1, el mejor ajuste para el Escenario 2 se produce siempre para el modelo de 3D. Es decir, para todos los valores del número de saltos, se cumple que el valor de la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,3D}$ es menor al valor de la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,2D}$.

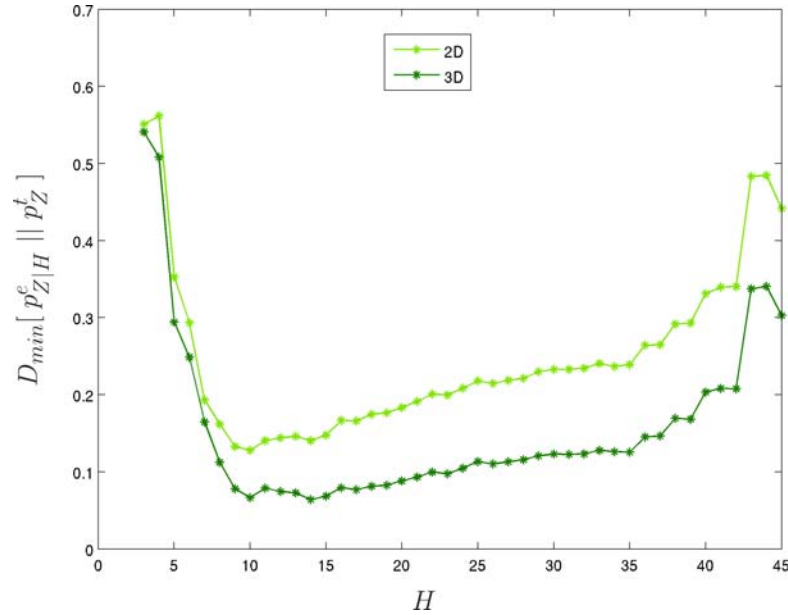


FIGURA 6.24: Escenario 2. Evolución de la DKL mínima, $D_{min}[p_{Z|H}^e || p_Z^t]$, en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

Dado que el mejor ajuste para cualquier número de saltos se alcanza con el modelo de 3D, en la Figura 6.25 se muestran las PMFs experimentales condicionadas al número de saltos, $p_{Z|H}^e$ del Escenario 2 frente a la PMF óptima, $p_Z^{t,3D}$. Aquí, el intervalo de integración para la transformación de la PDF teórica a su equivalente discreto PMF tiene una longitud de 0.02, ya que el número de valores de R/L diferentes es un orden de magnitud superior al del Escenario 1. Esto da lugar a una resolución del 25%. El máximo valor de z para evitar el *efecto de repunte* no es estrictamente creciente con el número de saltos, como se indicó en la Sección 6.1.6, por lo que el estudio de las distribuciones de $p_{Z|H}^e$ para $H = 3, H = 4, H = 5, H = 6, H = 7$ y $8 \leq H \leq 45$ ha de realizarse de manera independientemente. A la vista de la Figura 6.24, los mejores ajustes se obtienen para el modelo de 3D y para $H = 10, 12, 13, 14, 15$. Por tanto, de entre las ocho $p_Z^{t,3D}$ mostradas, la más similar a su correspondiente $p_{Z|H}^e$ es aquí la referida a $H = 15$.

Para el Escenario 2, la Figura 6.26 muestra la evolución de las PMF teóricas del modelo que mejor se ajusta a las PMFs experimentales, el modelo de 3D. En comparación con la Figura 6.21, se observa para el Escenario 2 un valor de probabilidad mayor para valores pequeños de H y altos de z . Este fenómeno se debe a que el alcance a segundos

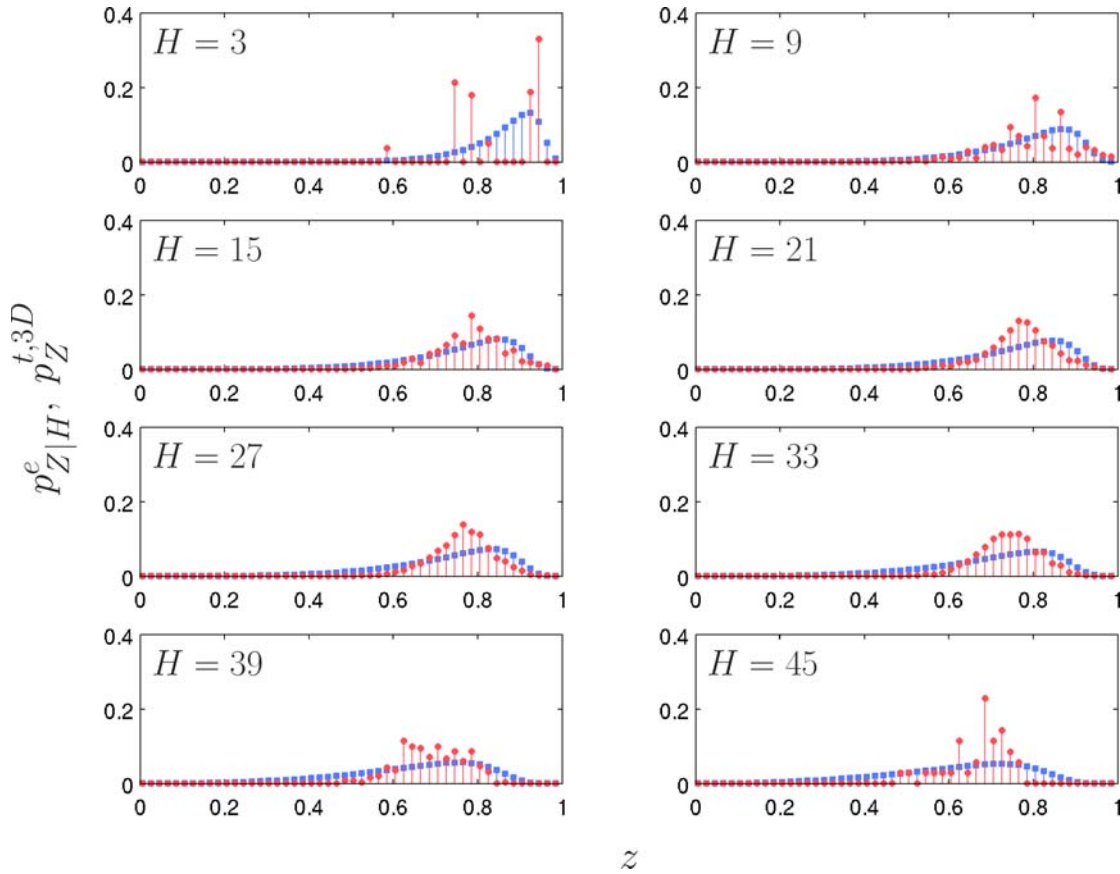


FIGURA 6.25: Escenario 2. Comparación de $p_{z|H}^e$ (rojo) frente a $p_z^{t,3D}$ (azul) en función de z con $H = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45$

vecinos incrementa considerablemente el valor de la eficiencia, ya que en un único salto se pueden alcanzar ocho destinos en lugar de cuatro. La cresta de la superficie tiene una caída más abrupta, sugiriendo que para valores altos de H , las probabilidades de obtener valores altos de z disminuye a un ritmo mayor que para el Escenario 1, ya que en el Escenario 2 es más difícil tener un número elevado de saltos. Por ejemplo, las curvas de nivel indican que los valores de $z \geq 0,8$ sólo pueden darse para un número de saltos $H \leq 15$.

Para verificar la intuición inicial basada en que la directividad de este escenario es mayor que la del Escenario 1, en la Figura 6.27 se presenta la evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función del número de saltos para el Escenario 2. Para valores reducidos de H se obtienen valores elevados, especialmente para $H = 3$, en el que $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,98$. Sin embargo, al contrario de lo que sucedía en el Escenario 1, la tendencia de las curvas es decreciente, es decir, a medida que aumenta el número de saltos, la directividad se ve reducida. Tanto para el Escenario 1 como para el Escenario 2, el diámetro de la red es $D = 33$. Como cabe esperar, cuando el número de saltos supera el diámetro de la red, la directividad decrece a un ritmo mayor, lo que se refleja en una mayor pendiente a partir

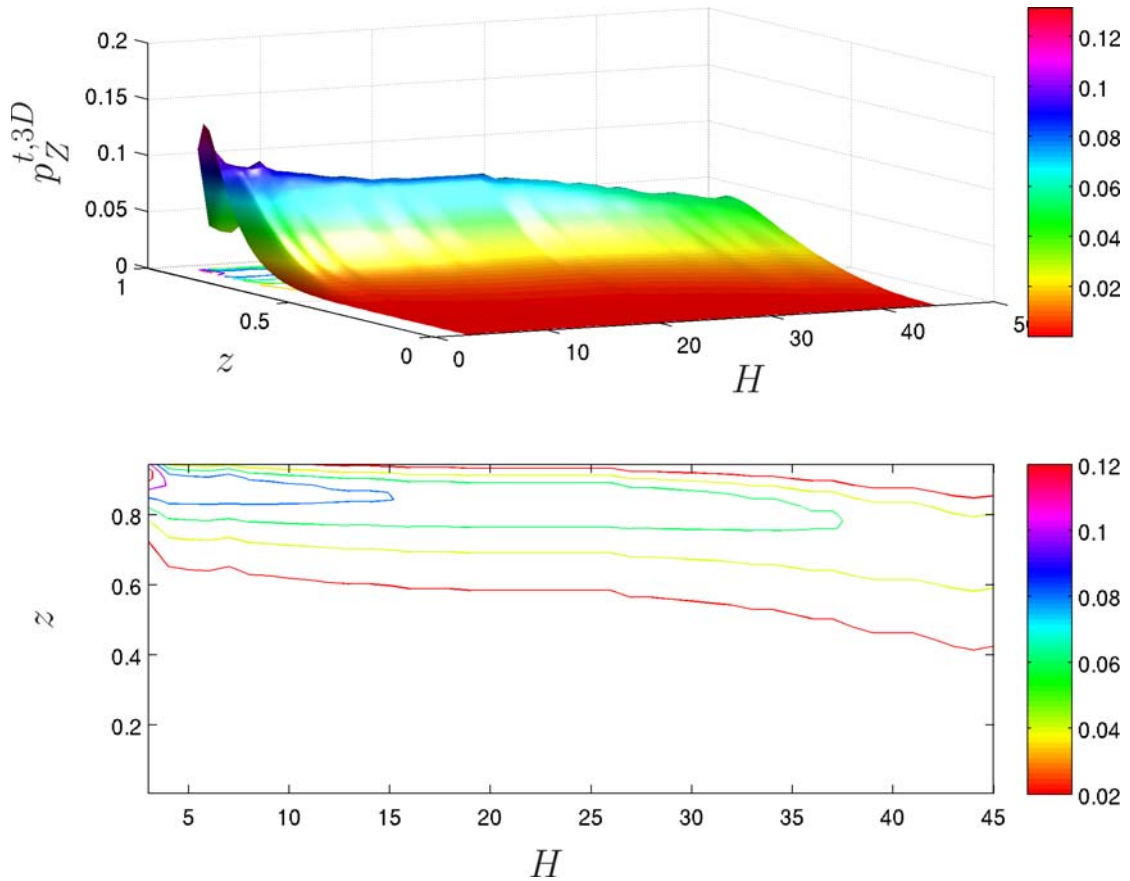


FIGURA 6.26: Escenario 2. Representación tridimensional de la $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z

de $H = 33$. Por último, el rango variación de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ es más elevado en el Escenario 2 que en el Escenario 1, ya que aquí hay una diferencia de 0,71 entre los valores máximo y mínimo para el caso de 3D, lo que apunta que la directividad tiene una gran variación por la duplicación del grado de los nodos.

6.2.3. Análisis de los resultados para el Escenario 3

Este escenario se caracteriza por tener una topología triangular. En él, los 919 nodos que componen la red no están perfectamente equiespaciados, ya que se introduce un factor de desplazamiento $\sigma = 20$. Esta circunstancia, unida al hecho de que en una topología triangular con alcance a primeros vecinos el grado de un nodo es máximo, augura buenos niveles de eficiencia en comparación con los de una topología cuadrada con igual rango de alcance. Sin embargo, ésta es la única configuración en la que el número de nodos no rebasa el millar, por lo que cabe estudiar el efecto de que el número de rutas sea inferior al del resto de escenarios.

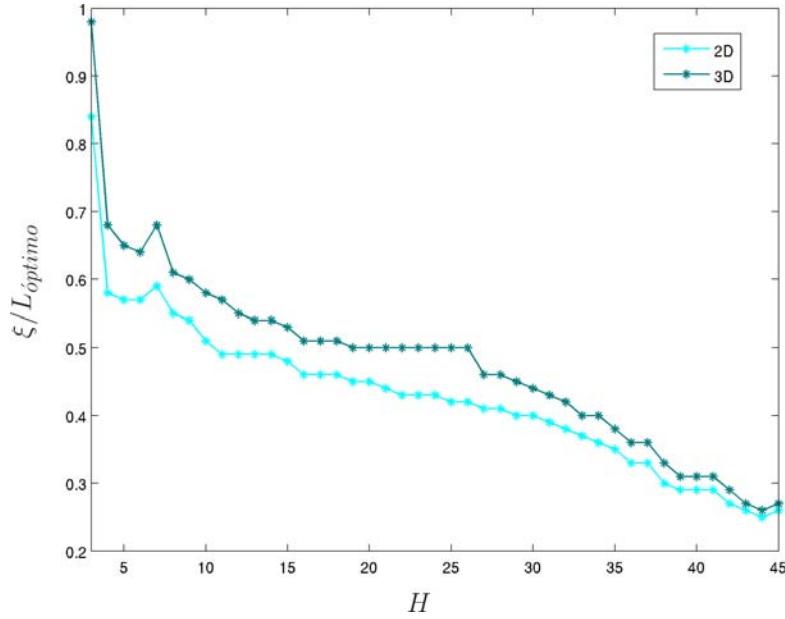


FIGURA 6.27: Escenario 2. Evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

La Figura 6.28 muestra el valor mínimo de la DKL en función de H para 2D y 3D en el Escenario 3. En comparación con las curvas mostradas en las Figuras 6.24 y 6.19, los valores de la DKL son aquí inferiores, revelando que los dos modelos teóricos, $p_Z^{t,2D}$ y $p_Z^{t,3D}$, se aproximan más a una red con topología triangular que a una red con topología cuadrada. Los valores mínimos de la DKL se obtienen para los valores próximos a $H = 10$, lo que indica que las p_Z^t elegidas para estos valores de H son más semejantes a las $p_{Z|H}^e$ correspondientes que para el resto de saltos. Los valores de la DKL siguen una tendencia mayoritariamente creciente, lo que implica que, a medida que aumenta el número de saltos, el grado de semejanza entre los datos teóricos y los experimentales disminuye. Es preciso resaltar que, al igual que en el caso de los escenarios con topología cuadrada, el mejor ajuste para este escenario se produce para el modelo de 3D, ya que la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,3D}$ es siempre menor que la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,2D}$.

La Figura 6.29 presenta los ajustes del modelo de 3D, puesto que se trata del modelo teórico óptimo. De manera análoga a lo incluido para los anteriores escenarios, se muestran las PMFs experimentales condicionadas al número de saltos, $p_{Z|H}^e$ del Escenario 3 frente a la correspondiente PMF óptima, $p_Z^{t,3D}$. Nótese que los valores del eje de ordenadas para $H = 3$ y $H = 45$ son superiores a los del resto de saltos. Para este escenario se cuenta con 66292 valores diferentes del cociente R/L , lo que permite reducir la longitud del intervalo de integración respecto a la de los escenarios de topología cuadrada a 0.01. La resolución que se alcanza, por tanto, es del 50 %. El valor considerado para solventar el cálculo incorrecto de los valores de la DKL es $z_{max} = 0,99$, despreciando entonces los

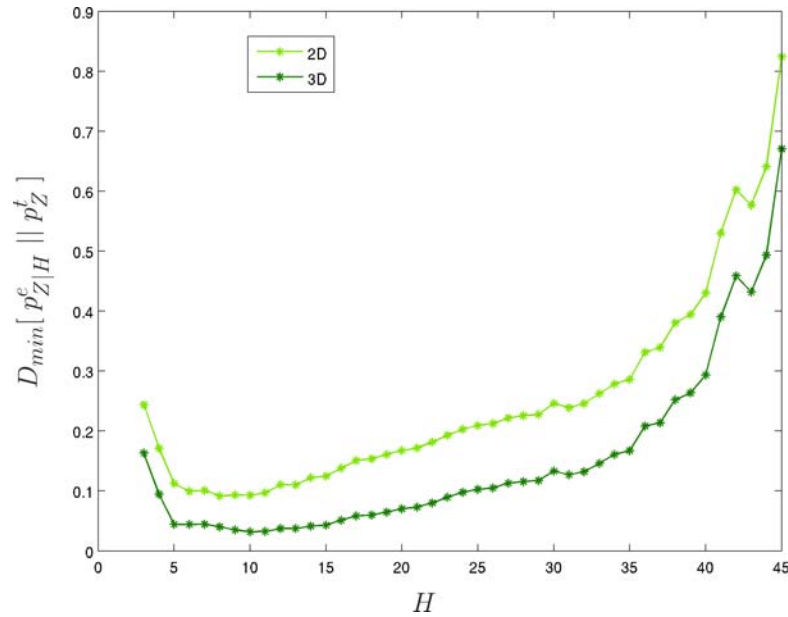


FIGURA 6.28: Escenario 3. Evolución de la DKL mínima, $D_{min}[p_{Z|H}^e || p_Z^t]$, en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

dos últimos puntos, $z = 0,995$ y $z = 1$. Según los resultados para 3D mostrados en la Figura 6.28, las $p_Z^{t,3D}$ que mejor modelan las $p_{Z|H}^e$ se tienen en los valores de $H \in [5, 15]$. Se detecta un aspecto interesante para $H = 9$ y $H = 15$, puesto que la forma de $p_{Z|(H=9)}^e$ y $p_{Z|(H=15)}^e$ presenta nítidamente un cierto número de máximos locales. Estos máximos locales son seis, correspondiendo cada uno las seis direcciones preferentes en una topología triangular.

La evolución de las PMF teóricas óptimas en función de H para el Escenario 3, $p_Z^{t,3D}$, se ofrece en la Figura 6.30. Se observa cierta similitud con la superficie representada en la Figura 6.26 para el Escenario 2, ya que en el Escenario 3 también se observa un valor de probabilidad mayor para valores pequeños de H y altos de z . Aquí, sin embargo, esos altos valores de probabilidad se extienden a un mayor número de saltos, ya que ahora se obtienen valores de $z \geq 0,8$ hasta $H \approx 33$.

La evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función del número de saltos para el Escenario 3 se presenta en la Figura 6.31. La tendencia de las curvas es similar a las mostradas en la Figura 6.27, pese a que aquí el decrecimiento no es tan pronunciado. Esto señala que la reducción de la directividad en función del número de saltos no es tan abrupta como en el Escenario 2. Los valores de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ para los primeros números de saltos son muy elevados, obteniendo el máximo $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,87$ para $H = 3, 4$. De manera análoga al escenario anterior, aquí también se tiene un amplio rango de valores de $\xi/L_{\text{óptimo}}$, siendo 0,63 la diferencia entre el valor máximo y mínimo para el caso del modelo de 3D, modelo que mejor ajusta a los datos experimentales.

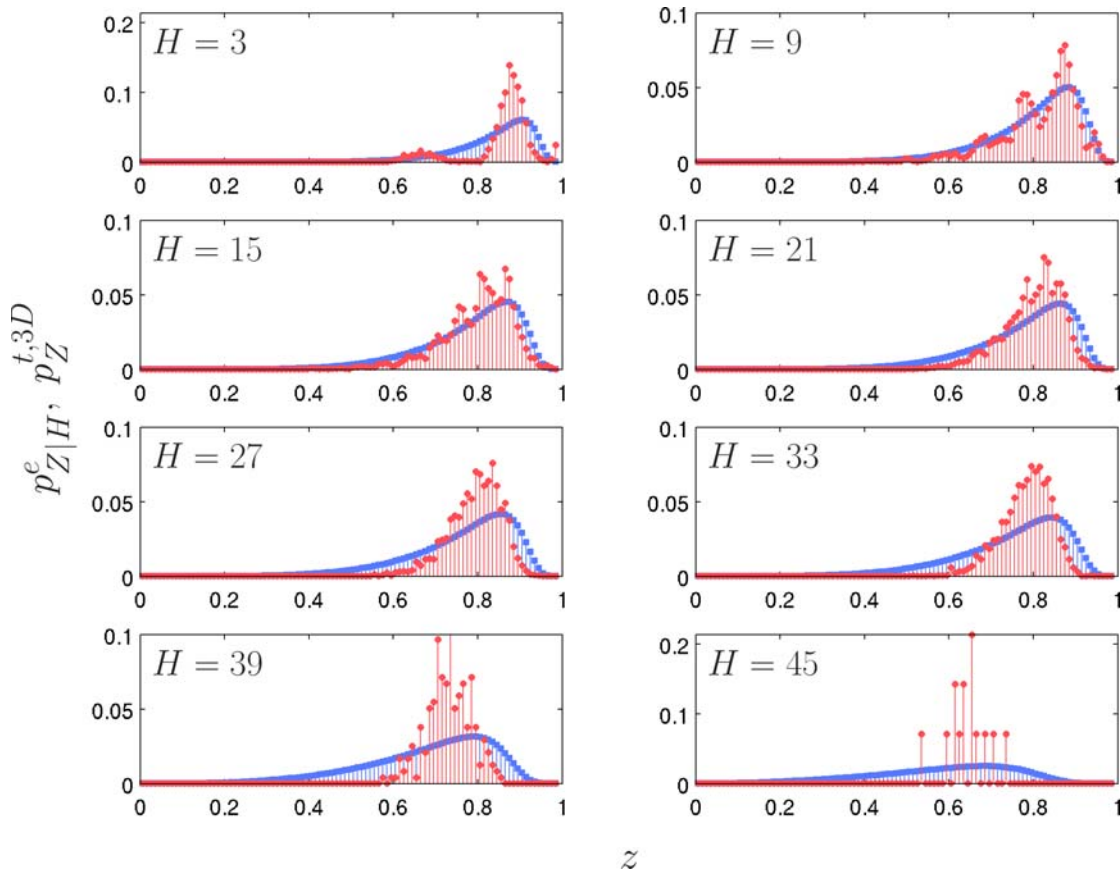


FIGURA 6.29: Escenario 3. Comparación de $p_{Z|H}^e$ (rojo) frente a $p_Z^{t,3D}$ (azul) en función de z con $H = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45$

6.2.4. Análisis de los resultados para el Escenario 4

El Escenario 4, al igual que el Escenario 3, se caracteriza por una topología triangular, un factor de desplazamiento $\sigma = 20$ y una rango de cobertura a primeros vecinos. La única diferencia es el número de nodos. Mientras que en el Escenario 3 la red está compuesta por 919 nodos, aquí la red es mucho más extensa, estando integrada por 1387 nodos. Cabe esperar una alta eficiencia del protocolo en estas circunstancias, puesto que el grado de los nodos es máximo y se trata de la configuración con mayor número de nodos.

La evolución del valor mínimo de la DKL en función de H para los modelos de 2D y 3D en el Escenario 4 se presenta en la Figura 6.32. Cabe recalcar, que al igual que en el resto de escenarios, la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,3D}$ es menor que la divergencia entre la $p_{Z|H}^e$ y las $p_Z^{t,2D}$ para cualquier número de saltos. Por tanto, se puede afirmar que el mejor ajuste siempre es el proporcionado por el modelo de 3D, de manera independiente a la configuración topológica. En adición a esto, puesto que los valores de la DKL son mucho más reducidos que los mostrados en las Figuras 6.19, 6.24 y 6.28,

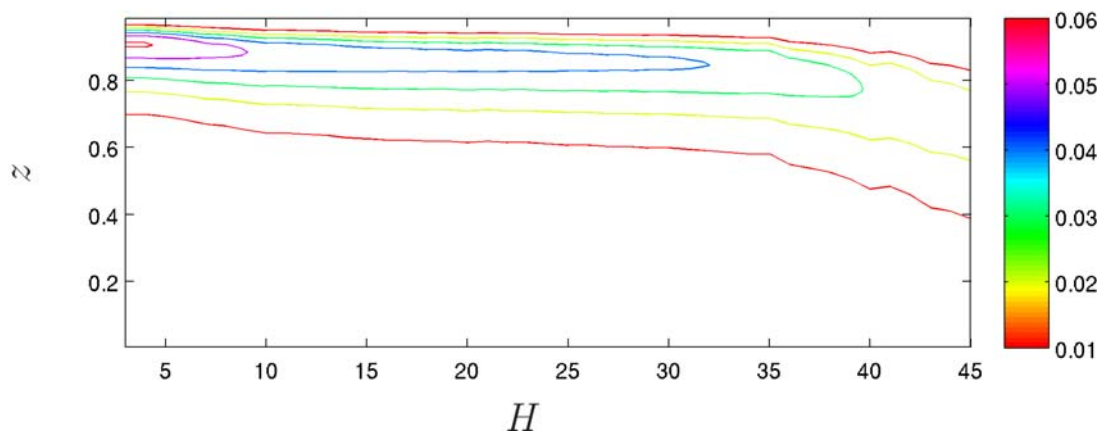
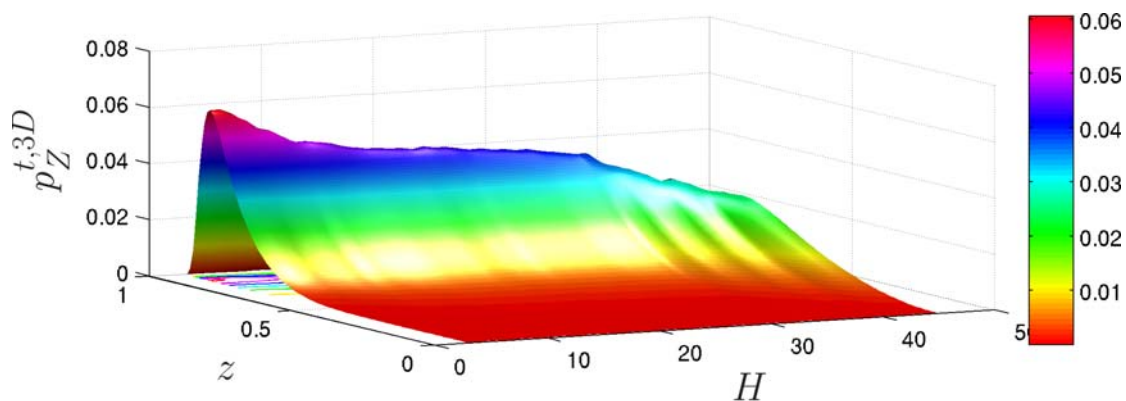


FIGURA 6.30: Escenario 3. Representación tridimensional de la $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z

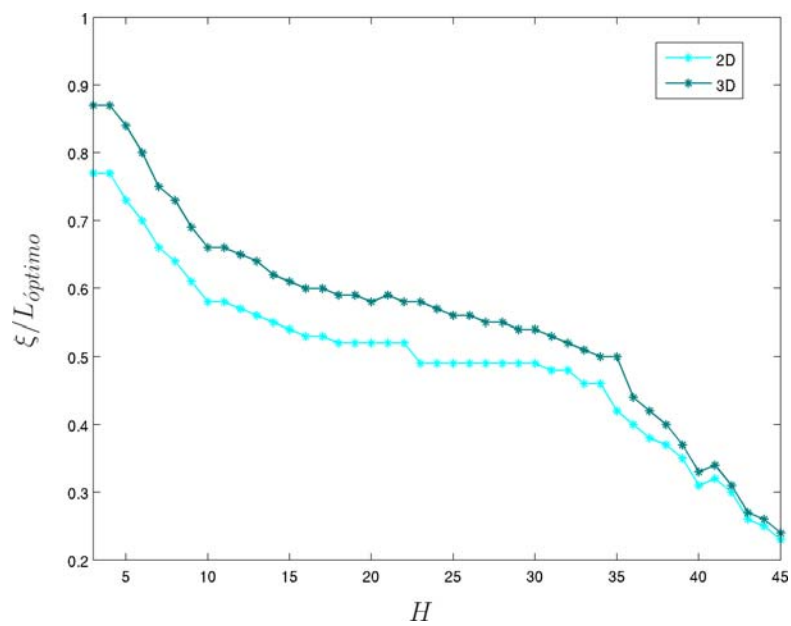


FIGURA 6.31: Escenario 3. Evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

éste es el escenario para el que las PMF teóricas óptimas, $p_Z^{t,3D}$, son más similares a las PMFs experimentales, $p_{Z|H}^e$, obteniendo el mejor ajuste para $H = 11$.

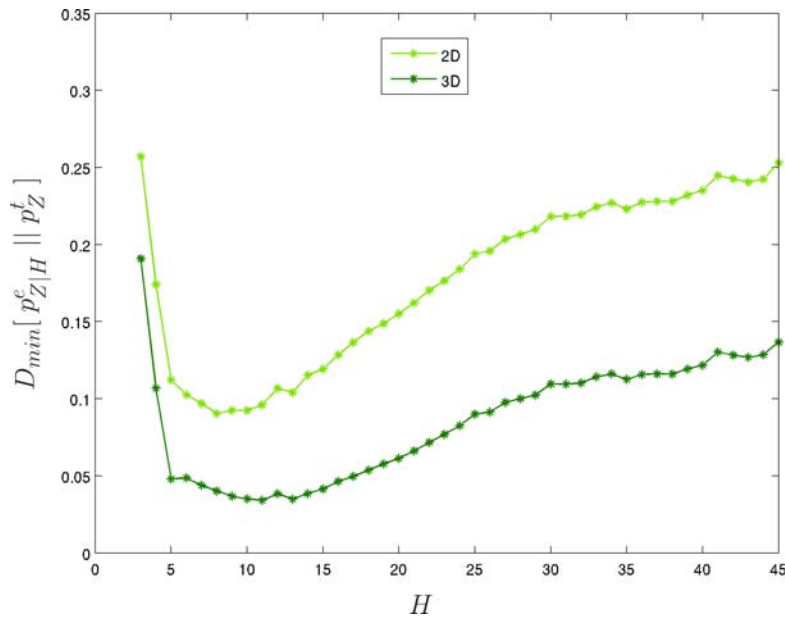


FIGURA 6.32: Escenario 4. Evolución de la DKL mínima, $D_{min}[p_{Z|H}^e || p_Z^t]$, en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

Al igual que en los escenarios anteriores, se presenta en la Figura 6.33 las PMFs experimentales condicionadas al número de saltos, $p_{Z|H}^e$ frente a la PMF óptima sobre el mismo eje z , $p_Z^{t,3D}$. Este escenario es el que propicia mayor variedad de valores del cociente R/L , teniendo un espacio muestral de 168199 valores distintos. Esto permite emplear la resolución máxima, para lo cual se toma como longitud del intervalo de integración el mínimo incremento de los valores de Z^t , 0.005. Con el fin de evitar el indeseable *efecto de repunte*, se elige $z_{max} = 0,99$, al igual que en el Escenario 3. Como se ha comentado, éste es el escenario en el que los modelos teóricos se ajustan mejor a las PMF experimentales, obteniendo para $H \in [9, 14]$ los valores de divergencia mínima. De los ocho ajustes mostrados en esta Figura, la $p_Z^{t,3D}$ más próxima a su respectiva $p_{Z|H}^e$ es la relativa a $H = 9$. Como se puede apreciar para $H = 9$ y $H = 15$, se produce el mismo efecto de los seis máximos locales comentado para el Escenario 3, originado por las seis direcciones preferentes de cualquier topología triangular.

La Figura 6.34 muestra la evolución de las PMF teóricas óptimas para el Escenario 4. Como se observa, existe un gran parecido con la superficie mostrada en la Figura 6.30: la forma de ambas superficies es prácticamente idéntica a excepción del decaimiento en la región de saltos elevados. Si bien en la superficie correspondiente al Escenario 4 los valores de probabilidad se reducen levemente a medida que aumenta el número de saltos, la superficie correspondiente al Escenario 3 muestra una caída mucho más

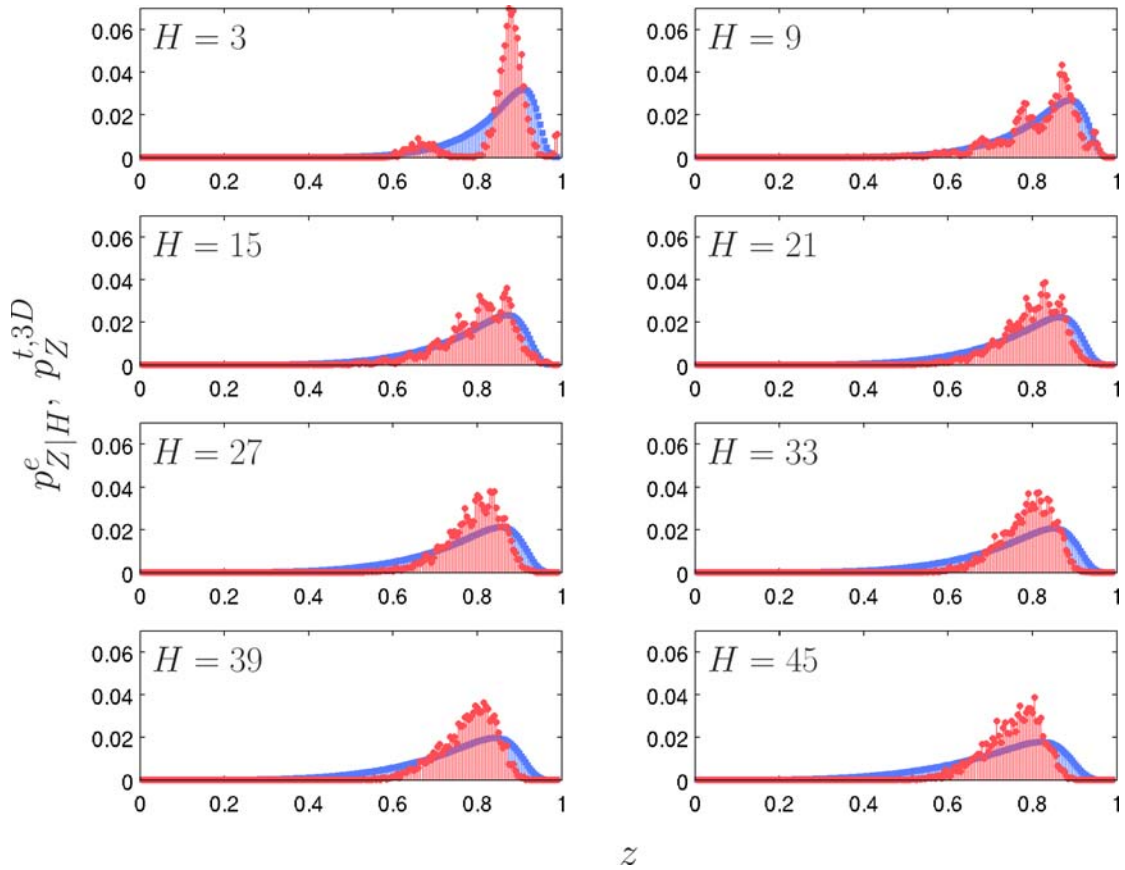


FIGURA 6.33: Escenario 4. Comparación de $p_{Z|H}^e$ (rojo) frente a $p_Z^{t,3D}$ (azul) en función de z con $H = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45$

abrupta para estos últimos valores de H . Otra diferencia que se percibe es el decremento en los valores de las probabilidades, al tiempo que se alargan las curvas de nivel. Ambos efectos se deben a que los escenarios constan de un número de nodos diferentes. El caso de comunicación más desfavorable es aquél que se produce entre nodos ubicados en extremos diagonalmente opuestos, es decir, separados una distancia $R = D \cdot d$. Mientras que el Escenario 3 está integrado por 919 nodos y su diámetro es de $D = 35$ nodos, el Escenario 4 comprende 1387 nodos con un diámetro de $D = 43$ nodos. Por ello, el Escenario 4 es susceptible de albergar rutas más largas y, por tanto, de tener los mismos valores de probabilidad para valores más elevados del número de saltos.

La directividad del Escenario 4 se estudia en la Figura 6.35 a partir de la evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función del número de saltos. De igual forma a lo representado en la Figura 6.31 para el Escenario 3, la tendencia es siempre decreciente, llegando a $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,44$ para $H = 45$. Los valores de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ aquí obtenidos son indudablemente mejores que los correspondientes al Escenario 1, de topología cuadrada y alcance a primeros vecinos, e incluso son generalmente superiores a los correspondientes al Escenario 2, también con topología cuadrada pero con alcance a segundos vecinos. Al

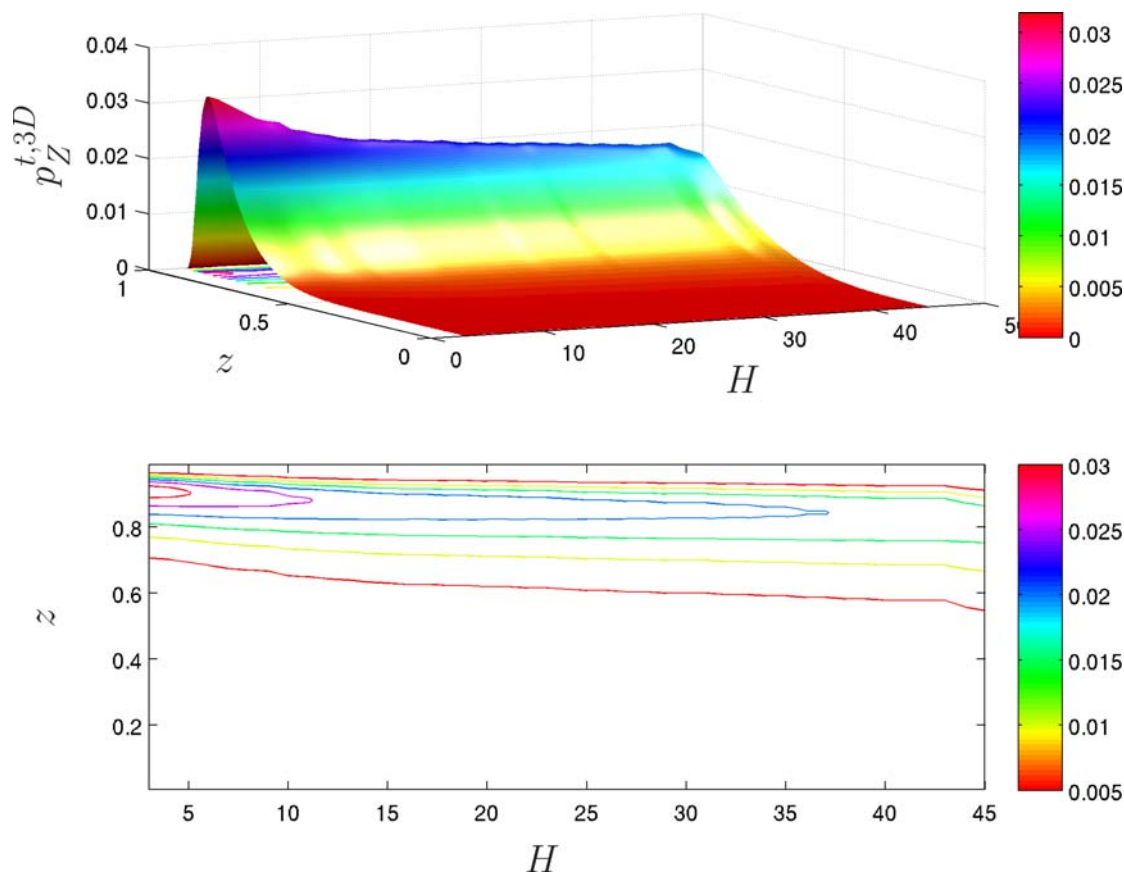


FIGURA 6.34: Escenario 4. Representación tridimensional de la $p_Z^{t,3D}$ óptima en función de H y z

igual que para el Escenario 2 y el Escenario 3, la mayor directividad también se consigue para $H = 3$. Recuérdese que el caso de $H = 1$ no se considera, ya que da lugar a una ruta óptima puesto que $R = L$, y el caso $H = 2$ se estudia aparte en la Sección 6.1.6. Puesto que la tendencia de las curvas de ambos escenarios es muy semejante, el mínimo se tiene para el máximo número de saltos, con $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,27$ para el Escenario 2 y $\xi/L_{\text{óptimo}} = 0,44$ para el Escenario 4.

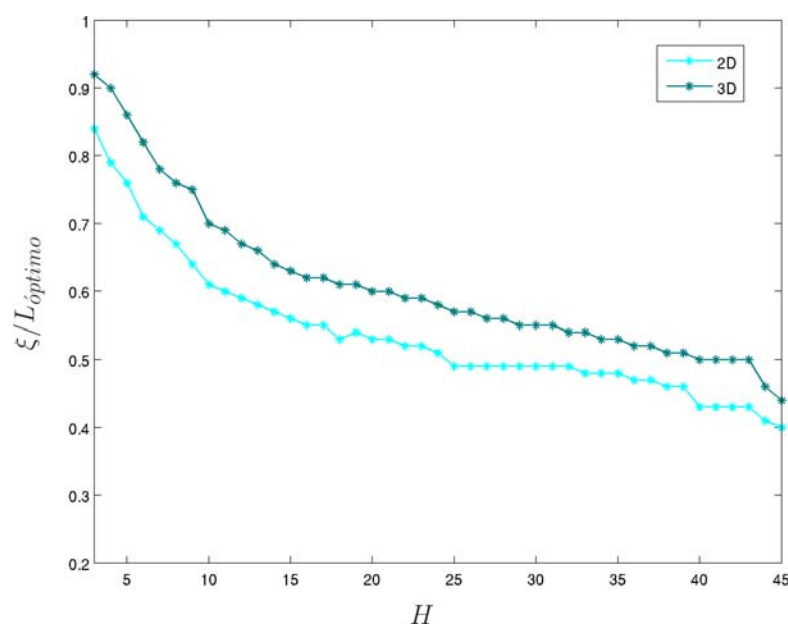


FIGURA 6.35: Escenario 4. Evolución del valor de $\xi/L_{\text{óptimo}}$ en función de H para los modelos teóricos de 2D y 3D

Capítulo 7

Conclusiones y líneas de trabajo futuras

Los contenidos de este capítulo final surgen de la reflexión acerca del trabajo realizado. En primer lugar, en la Sección 7.1, se exponen las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos. En segundo y último lugar, en la Sección 7.2, se proponen varias líneas de investigación que dan continuidad a este proyecto.

7.1. Conclusiones

A partir de los resultados analizados en el Capítulo 6 se determinan cualitativamente las prestaciones del protocolo AODV en términos de eficiencia de encaminamiento. Esta evaluación de prestaciones se efectúa a partir de tres parámetros clave en una red *ad hoc* inalámbrica: topología, número de nodos y alcance. A continuación se enuncian las principales conclusiones de manera sintetizada:

- **Un modelo continuo no es aplicable directamente a los modelos de redes reales.** En un modelo continuo el número de nodos es infinito, por lo que una v.a. aleatoria que modela la eficiencia de una ruta entre un nodo origen y un nodo destino, como $Z = R/L$, es una v.a. continua. Por el contrario, en una red real, y pese a que sea una red de gran escala, el número de nodos siempre es finito, por lo que la v.a. que modela la eficiencia de una ruta ha de ser discreta. Para hacer un estudio comparable de las distribuciones de ambas vv.aa. (continua y discreta), es preciso trabajar en el mismo dominio. Por las restricciones impuestas por la naturaleza de una v.a. discreta, se han de manejar masas de probabilidad en lugar de densidades de probabilidad.

- **Los modelos teóricos de 3D modelan más fielmente los resultados experimentales.** Pese a que los nodos de las redes simuladas se disponen sobre un espacio bidimensional, el modelo teórico de 2D presenta un ajuste más deficiente que el proporcionado por el modelo de 3D. Las razones que justifican este fenómeno se escapan del ámbito de este proyecto, puesto que el objeto de este trabajo no abarca la elaboración analítica de los datos teóricos sino su aplicación sobre los datos experimentales.
- **Para dos escenarios con la misma topología, se observa mayor eficiencia cuanto mayor es el radio de cobertura de cada nodo.** Los dos escenarios con topología cuadrada (Escenario 1 y Escenario 2) difieren en el rango de cobertura de los nodos. Al comparar ambos escenarios, se observa una mayor eficiencia cuando el alcance es a segundos vecinos en lugar de a primeros vecinos. Esto se produce porque el grado de conectividad de un nodo se duplica y, en consecuencia, también se duplica el número de direcciones preferentes.
- **Para dos escenarios con la misma topología y alcance a primeros vecinos, se obtiene mayor eficiencia cuanto mayor es el número de nodos de la red.** Los dos escenarios con topología triangular (Escenario 3 y Escenario 4) se distinguen por el número de nodos. Al comparar ambos resultados, se observa una leve mejora de la eficiencia en el escenario de mayor número de nodos. Puesto que para un escenario, la eficiencia cae abruptamente cuando el número de saltos supera el diámetro de la red, esta diferencia entre la eficiencia de los dos escenarios se acrecienta cuando el número de saltos supera el diámetro de la red del escenario con menor número de nodos.
- **Para dos escenarios con diferente topología, se obtiene mayor eficiencia cuanto mayor es el grado de conectividad de los nodos.** Las prestaciones son mejores en los escenarios con topología triangular, puesto que el grado de los nodos es superior en un 50 % al grado de los nodos en una topología cuadrada. Obsérvese que el nivel de eficiencia óptimo se obtendría para un número infinito de primeros vecinos.
- **En una red regular real, la mayor eficiencia se tendrá para un escenario triangular con el máximo alcance posible.** Partiendo de una estructura cuasi-regular de la red, una topología triangular ofrece el mayor grado de conectividad en un espacio bidimensional. Atendiendo a la naturaleza de las redes *ad hoc* inalámbricas en cuanto a las restricciones de potencia, cabe esperar que la mayor eficiencia se conseguirá para esta configuración topológica y considerando el mayor rango de cobertura practicable sin que se degraden las prestaciones de la red.

7.2. Líneas de trabajo futuras

El ámbito de las redes *ad hoc* inalámbricas propicia una gran variedad de aspectos a explorar. Las propias limitaciones inherentes a este tipo de redes ofrecen numerosas posibilidades de investigación. En relación al proyecto realizado se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- **Estudiar las causas por las que el modelo teórico que mejor caracteriza los resultados experimentales es el modelo de 3D.** Esta propuesta implicaría analizar en profundidad el modelo teórico desarrollado en el departamento para averiguar las condiciones que producen que, para una red desplegada en un plano, tenga una mejor respuesta el modelo de 3D.
- **Estudiar las prestaciones en una red en la que los nodos se disponen en un espacio tridimensional.** Esta propuesta está en la línea de lo comentado en el anterior punto, generalizando los resultados aquí obtenidos. Consistiría en analizar redes en las que los nodos están dispuestos en un espacio de tres dimensiones.
- **Estudiar las prestaciones en una red con topología hexagonal sobre un espacio bidimensional.** Este trabajo ampliaría los experimentos realizados al examinar los efectos de una topología en la que el grado de conectividad de los nodos es inferior al de los escenarios con topología cuadrada o triangular.
- **Estudiar las prestaciones en una red en condiciones de acceso múltiple.** Este trabajo extendería el análisis desarrollado en este proyecto al considerar el caso en el que los nodos se comunican simultáneamente. Implicaría estudiar cómo los mecanismos de detección y evasión de colisiones incurren en la degradación de la eficiencia de encaminamiento.
- **Estudiar las prestaciones en una red compuesta por nodos móviles.** Este trabajo complementaría este proyecto con la evaluación de escenarios en los que los nodos se desplazan (a velocidades constantes o variables) durante la comunicación. Esta propuesta se puede concretar en el estudio sobre servicios vehiculares, ya que otra de las líneas de investigación del departamento son las comunicaciones intervehiculares.
- **Estudiar las prestaciones en una red de formación espontánea.** Esta propuesta daría continuidad a este proyecto al tratar redes con un número de nodos variable. Conllevaría estudiar el comportamiento de redes en las que los nodos se incorporan y abandonan dicha red dinámicamente. Como aplicación de este trabajo, se propone el estudio de redes *ad hoc* para reuniones, conferencias y congresos, en los que los participantes se adherirían a la red de forma dinámica.

- **Estudiar las prestaciones de otros protocolos.** En el terreno de los protocolos de encaminamiento se abren abundantes propuestas de estudio debido al amplio abanico de protocolos de encaminamiento para redes *ad hoc* existentes. Puesto que el protocolo estudiado en este proyecto es proactivo, sería interesante analizar cómo afecta a la eficiencia de encaminamiento el hecho de que el protocolo sea reactivo. Se proponen los protocolos GSR, OLSR, FSR y HSR, puesto que todos ellos son adecuados para redes densas y extensas.

Bibliografía

- [1] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, editors. *Mobile Ad Hoc Networking*. IEEE Press and John Wiley & Sons, Inc., Piscataway, NJ and New York, NY, April 2004.
- [2] E. Royer and Chai-Keong Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *Personal Communications, IEEE [see also IEEE Wireless Communications]*, 6(2):46–55, 1999.
- [3] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)*. Prentice Hall PTR, December 2001.
- [4] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2005.
- [5] O.K. Tonguz and G. Ferrari, editors. *Ad Hoc Wireless Networks: A Communication-Theoretic Perspective*. IEEE Press and John Wiley & Sons, Inc., May 2006.
- [6] IF Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [7] Jiwon Park, Sangman Moh, and Ilyong Chung. A multipath aodv routing protocol in mobile ad hoc networks with sinr-based route selection. In *Wireless Communication Systems. 2008. ISWCS '08. IEEE International Symposium on*, pages 682–686, 2008.
- [8] Juan José Vinagre Díaz. *Teoría del Encaminamiento en Redes Ad Hoc Inalámbricas*. PhD thesis, Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid, Spain, July 2007.
- [9] Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. IEEE Standard 802.11, June 1999.
- [10] Internetworking technology handbook. Consultado el 2 de Febrero de 2009. www.cisco.com/en/US/docs/internetworking/technology/handbook/ito_doc.html.

-
- [11] S. Buruhanudeen, M. Othman, and B.M. Ali. Existing manet routing protocols and metrics used towards the efficiency and reliability- an overview. pages 231–236, May 2007.
- [12] Mehran Abolhasan, Tadeusz Wysocki, and Eryk Dutkiewicz. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 2(1):1–22, January 2004.
- [13] Laura Marie Feeney. A taxonomy for routing protocols in mobile ad hoc networks. Technical report, Swedish Institute of Computer Science, 1999.
- [14] Geetha Jayakumar and G. Gopinath. Science publications ad hoc mobile wireless networks routing protocols – a review. Number 8, pages 574–582, 2007.
- [15] Mr. Ankur Khetrapal. Routing techniques for mobile ad hoc networks classification and qualitative/quantitative analysis, 2006.
- [16] Petteri Kuosmanen. Classification of ad hoc routing protocols. Technical report, Finnish Defence Forces, 2002.
- [17] Changling Liu and Jörg Kaiser. A survey of mobile ad hoc network routing protocols. Technical report, University of Magdeburg, October 2005.
- [18] Xukai Zou, Byrav Ramamurthy, and Spyros Magliveras. Routing techniques in wireless ad hoc networks classification and comparison. In N. Callaos, editor, *Proceedings of the Sixth World Multiconference on Systemics, Cybernetics, and Informatics, SCI 2002, July 15-18, 2002, Orlando, Florida, USA*, volume vol.4. Int. Inst. Inf. & Syst, January 2002.
- [19] Lichun Bao and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Topology management in ad hoc networks. In *MobiHoc '03: Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 129–140, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [20] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. In *ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, SIGCOMM '94, London, UK*, pages 234–244. ACM, August 1994.
- [21] Krishna Gorantala. Routing protocols in mobile ad-hoc networks. Master’s thesis, Department of Computing Science, Umeå University, Sweden, June 2006.
- [22] Qing He, Huanbei Zhou, Hui Wang, and Li Zhu. Performance comparison of two routing protocols based on wmn. pages 1726–1729, Sept. 2007.

- [23] David Lundberg. Ad hoc protocol evaluation and experiences of real world ad hoc networking. Master's thesis, Department of Information Technology, Uppsala University, Sweden, March 2001.
- [24] Ching-Chuan Chiang, Hsiao-Kuang Wu, Winston Liu, and Mario Gerla. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel. In *IEEE Singapore International Conference on Networks, SICON'97, April 16-17, 1997, Singapore*, pages 197–211. IEEE, April 1997.
- [25] S. Murthy and J.J. Garcia. An efficient routing protocol for wireless networks. *Mobile Networks and Applications*, 1(2):183–197, 1996.
- [26] Tsu-Wei Chen and Mario Gerla. Global state routing: A new routing scheme for ad-hoc wireless networks. In *IEEE International Communications Conference, ICC '98, June 1998, Atlanta, GA, USA*, volume 1, pages 171–175 vol.1. IEEE, June 1998.
- [27] Thomas Clausen and Philippe Jacquet. Optimized link state routing protocol (olsr). RFC 3626, Internet Engineering Task Force, October 2003.
- [28] Guangyu Pei, Mario Gerla, and Tsu-Wei Chen. Fisheye state routing in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing, April 2000, Taipei, Taiwan*, pages D71–D78. ICDCS, April 2000.
- [29] Guangyu Pei, Mario Gerla, Xiaoyan Hong, and Ching-Chuan Chiang. A wireless hierarchical routing protocol with group mobility. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC1999, September 1999, New Orleans, LA, USA*, pages 1538–1542. IEEE, September 1999.
- [30] David B. Johnson and David A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In Thomasz Imielinski and Hank Korth, editors, *Mobile Computing*, volume 353, chapter 5, pages 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [31] David B. Johnson, David A. Maltz, and Josh Broch. Dsr: The dynamic source routing protocol for multihop wireless ad hoc networks. In C.E. Perkins, editor, *Ad Hoc Networking*, chapter 5, pages 139–172. Addison-Wesley, 2001.
- [32] Charles E. Perkins and Elizabeth M. Royer. Adhoc ondemand distance vector routing. In *In Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pages 90–100, 1999.
- [33] C. Perkins, E. Royer, and S. Das. Rfc 3561 ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical report, Internet Engineering Task Force (IETF), 2003.

-
- [34] Vincent D. Park and M. Scott Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM'97, April 7-11, 1997, Kobe, Japan*, volume 3, pages 1405–1413. IEEE, April 1997.
- [35] Chai-Keong Toh. Long-lived ad hoc routing based on the concept of associativity. Internet-draft, IETF MANET Working Group, March 1999. Expired.
- [36] Rohit Dube, Cynthia D. Rais, Kuang-Yeh Wang, and Satish K. Tripathi. Signal stability-based adaptive routing (ssa) for ad hoc mobile networks. In *IEEE Personal Communications Magazine*, pages 36–45. IEEE, February 1997.
- [37] Vincent D. Park and M. Scott Corson. A performance comparison of the temporally-ordered routing algorithm and ideal link-state routing. In *In Proceedings of IEEE International Symposium on Systems and Communications. IEEE Computer*, pages 592–598. Society Press, 1998.
- [38] V.D. Park, J.P. Macker, and M.S. Corson. Applicability of the temporally-ordered routing algorithm for use in mobile tactical networks. volume 2, pages 426–430 vol.2, Oct 1998.
- [39] S. Gwalani, E. M. Belding-Royer, and C. E. Perkins. Aodv-pa: Aodv with path accumulation. volume 1, pages 527–531 vol.1, 2003.
- [40] Byung-Jae Kwak, Nah-Oak Song, and L.E. Miller. On the scalability of ad hoc networks. *Communications Letters, IEEE*, 8(8):503–505, Aug. 2004.
- [41] C.A. Santivanez, B. McDonald, I. Stavrakakis, and R. Ramanathan. On the scalability of ad hoc routing protocols. volume 3, pages 1688–1697 vol.3, 2002.
- [42] M. Scott Corson and Anthony Ephremides. A distributed routing algorithm for mobile wireless networks. *Wirel. Netw.*, 1(1):61–81, 1995.
- [43] Marc R. Pearlman, Student Member, Zygmunt J. Haas, and Senior Member. Determining the optimal configuration for the zone routing protocol. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17:1395–1414, 1999.
- [44] Chai-Keong Toh University and Chai keong Toh. Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks. *Wireless Personal Communications*, 4:103–139.
- [45] Eric W. Weisstein. Landau symbols. Consultado el 8 de Abril de 2009. <http://mathworld.wolfram.com/LandauSymbols.html>.
- [46] S. Corson and J. Macker. Mobile ad hoc networking (manet): Routing protocol performance issues and evaluation considerations. RFC 2501, Internet Engineering Task Force, United States, January 1999.

-
- [47] Azzedine Boukerche. Performance evaluation of routing protocols for ad hoc wireless networks. *Mob. Netw. Appl.*, 9(4):333–342, 2004.
- [48] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih C. Hu, and Jorjeta Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 85–97. ACM Press, 1998.
- [49] J. Hsu, S. Bhatia, M. Takai, R. Bagrodia, and M.J. Acriche. Performance of mobile ad hoc networking routing protocols in realistic scenarios. volume 2, pages 1268–1273 Vol.2, Oct. 2003.
- [50] Sung-Ju Lee, W. Su, J. Hsu, M. Gerla, and R. Bagrodia. A performance comparison study of ad hoc wireless multicast protocols. volume 2, pages 565–574 vol.2, 2000.
- [51] Sampo Naski. Performance of ad hoc routing protocols: Characteristics and comparison. *HUT T-110.551 Seminar on Internetworking*, April 2004.
- [52] Xin Zhang and George F. Riley. Scalability of an ad hoc on-demand routing protocol in very large-scale mobile wireless networks. *Simulation*, 82(2):131–142, 2006.
- [53] Alexa Sharp. Thoughts on the competitive ratio.
- [54] R. Cavazos-Cadena and E. Fernandez-Gaucheraud. Denumerable controlled markov chains with average reward criterion: sample path optimality. volume 1, pages 162–167 vol.1, Dec 1994.
- [55] Dorothea Wagner and Roger Wattenhofer, editors. *Algorithms for Sensor and Ad Hoc Networks, Advanced Lectures [result from a Dagstuhl seminar]*, volume 4621 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2007.
- [56] Miguel Ángel Ortuño Pérez. *Protocolo de encaminamiento en origen con identificadores no unicos para redes Ad-Hoc de dispositivos con recursos limitados*. PhD thesis, Departamento de Ingeniería Telemática y Tecnología Electrónica, Universidad Rey Juan Carlos, Julio 2006.
- [57] Janne Lindqvist Helsinki and Janne Lindqvist. Counting to infinity, 2004.
- [58] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. R. Das. Ip flooding in ad hoc mobile networks. Technical report, IETF Internet Draft, work in progress, 2001.
- [59] Ian D. Chakeres and Elizabeth M. Belding-Royer. Aodv routing protocol implementation design. In *AODV Routing Protocol Implementation Design*, Tokyo, Japan, March 2004.

-
- [60] L. Begg, W. Liu, K. Pawlikowski, S. Perera, and H. Sirisena. Survey of simulators of next generation networks for studying service availability and resilience. TR-COSC 05/06, Department of Computer Science and Software Engineering, University of Canterbury, February 2006.
- [61] Kevin Fall and Kannan Varadhan. The ns manual (formerly ns notes and documentation). Consultado el 20 de Febrero de 2009. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- [62] Kevin Fall and Kannan Varadhan. The ns-3 network simulator. Consultado el 30 de Marzo de 2009. <http://www.nsnam.org/doxygen-release/index.html>.
- [63] András Varga. Omnet++ discrete event simulation system. Consultado el 12 de Marzo de 2009. <http://www.omnetpp.org/>.
- [64] Second workshop on ns-2 (wns2 2008) organised in association with the third international conference on performance evaluation methodologies and tools (valuetools 2008). Consultado el 18 de Febrero de 2009. <http://www.wns2.org/>.
- [65] T. Lin, S. F. Midkiff, and J. S. Park. A dynamic topology switch for the emulation of wireless mobile ad hoc networks. *Local Computer Networks, Annual IEEE Conference on*, 0:0791, 2002.
- [66] B.S. Gukhool and S. Cherkaoui. Ieee 802.11p modeling in ns-2. pages 622–626, Oct. 2008.
- [67] S. Penz. Wireless multicast support for the ns-2 emulation environment. pages 267–273, Oct. 2007.
- [68] Tao Wu and S. Biswas. Off-network control for scalable routing in very large sensor networks. pages 3357–3363, June 2007.
- [69] A.V.D. Martin, A. Mihailovic, N. Georganopoulos, and A.H. Aghvami. Adaptation of transport protocols for an ip-micromobility scheme. volume 8, pages 2462–2466 vol.8, 2001.
- [70] S. Kurkowski, T. Camp, N. Mushell, and M. Colagrosso. A visualization and analysis tool for ns-2 wireless simulations: inspect. pages 503–506, Sept. 2005.
- [71] M. Ali, M. Welzl, A. Adnan, and F. Nadeem. Using the ns-2 network simulator for evaluating network on chips (noc). pages 506–512, Nov. 2006.
- [72] Kevin Fall and Kannan Varadhan. Previous releases of the ns-3 network simulator. Consultado el 30 de Marzo de 2009. <http://www.nsnam.org/releases/ns-3.0-pre-releases/>.

-
- [73] Eitan Altman and Tania Jiménez. Ns simulator for beginners. Consultado el 7 de Mayo de 2009. <http://citeseer.ist.psu.edu/716977.html>.
- [74] Eric W. Weisstein. Schläfli symbol. Consultado el 7 de Junio de 2009. <http://mathworld.wolfram.com/SchlaefliSymbol.html>.
- [75] Eric W. Weisstein. Tessellation. Consultado el 4 de Abril de 2009. <http://mathworld.wolfram.com/Tessellation.html>.
- [76] Chet Ramey. The gnu bourne-again shell reference manual. Consultado el 17 de Marzo de 2009. tiswww.case.edu/php/chet/bash/bashtop.html.
- [77] Eric W. Weisstein. Kissing number. Consultado el 2 de Febrero de 2009. <http://mathworld.wolfram.com/KissingNumber.html>.
- [78] Jaques des Cloizeaux and Jannink Gerard. *Polymers in Solution: Their Modelling and Structure*. Oxford University Press, 2006.
- [79] Monson H. Hayes. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. Wiley, March 1996.
- [80] Sheldon M. Ross. *Introduction to Probability Models, Eighth Edition*. Academic Press, January 2003.
- [81] Thomas M. Cover and Joy A. Thomas. *Elements of Information Theory 2nd Edition*. Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing. Wiley-Interscience, July 2006.
- [82] Solomon Kullback and Richard A. Leibler. On information and sufficiency. *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(1):79–86, 1951.
- [83] Eric W. Weisstein. Logarithm. Consultado el 12 de Junio de 2009. <http://mathworld.wolfram.com/Logarithm.html>.